ISSN: 1125-0402

ACCADEMIA DELLE SCIENZE
DI TORINO
Quaderni, 7 (1998)

I MERCOLEDÌ DELL'ACCADEMIA

VI



ACCADEMIA DELLE SCIENZE
DI TORINO
Quaderni, 7 (1998)

I MERCOLEDÌ DELL'ACCADEMIA

VI



Acc. Sc. Torino - Quaderni
7 (1998), 3-15, 6 ff.

Le immagini dell'Universo

Attilio FERRARI [*]

1. Introduzione

Sulle Alpi svizzere, al Gornergrat, di fronte alle splendide cime del Cervino e del Rosa, sui tetti di un romantico albergo costruito agli inizi del secolo, opera da oltre vent'anni un osservatorio astronomico italiano, il TIRGO (acronimo per Telescopio InfraRosso del GOrnergrat). Gli astronomi vi si dedicano a compiere osservazioni di sorgenti celesti nella banda elettromagnetica infrarossa, in quanto solo a quelle quote elevate, al di sopra dei bassi strati atmosferici ricchi di vapor acqueo, essa non è completamente assorbita.

Il telescopio del TIRGO permette di acquisire un'immagine dell'Universo del tutto diversa da quella cui siamo abituati dall'osservazione con i normali telescopi: i fotoni dell'infrarosso giungono ai nostri telescopi da nubi di polveri fredde, che assorbono e riprocessano i raggi luminosi del visibile emessi da oggetti cosmici che vi sono immersi e che quindi non sarebbero direttamente accessibili neppure ai potenti rivelatori ottici a bordo del telescopio spaziale, l'Hubble Space Telescope.

Altri analoghi osservatori, dedicati allo studio di oggetti astronomici sulle bande dello spettro elettromagnetico che vanno dall'infrarosso all'ottico e al vicino ultravioletto, operano in siti particolarmente favorevoli agli studi astronomici: per citarne alcuni, a Mauna Kea (Hawaii), alle Isole Canarie, a Kitt Peak e a Mount Graham (Arizona), a La Silla (Cile), ecc. Radiotelescopi sono disseminati su tutta la Terra, da Medicina in Italia, a Socorro nel Nuovo Messico, a Westerbork in Olanda, a Parkes in Australia. E per osservare le bande dell'ultravioletto lontano e dei raggi X e gamma sono state poste stazioni permanenti in orbita intorno al pianeta al di sopra dell'atmosfera. Il più recente osservatorio

---

[*] Accademia delle Scienze di Torino; direttore dell'Osservatorio Astronomico di Torino.
Conferenza tenuta il 15 Gennaio 1997.

nella banda X è stato progettato e costruito dagli scienziati italiani ed è in orbita dal 1996, il SAX.

Questi sviluppi iniziarono nella prima metà di questo secolo quando gli astronomi compresero come le sorgenti cosmiche non fossero solo le stelle simili al nostro Sole, ma esistessero stelle molto calde e molto fredde, e tenui nuvole di gas freddi o di polveri, nuvole di gas caldissimi, giganteschi agglomerati compatti di neutroni, giganteschi vortici di materia che si avvitano intorno a buche di potenziale gravitazionale intensissime. Per studiare queste sorgenti, che hanno emissioni caratteristiche nelle bande infrarosse, ultraviolette o a raggi X e gamma, fu appunto necessario estendere i nostri strumenti di rivelazione a risonare con queste altre frequenze elettromagnetiche.

Di conseguenza, mentre la storia antica dell'astronomia è stata caratterizzata soprattutto dalla necessità di definire con la massima precisione, attraverso ad osservazioni effettuate nella banda del visibile, la posizione degli oggetti nel cielo (stelle e pianeti) e di seguirne i moti in modo da avere uno schema della loro cinematica, misurandone distanze, temperature e luminosità, la moderna astronomia si è spinta a migliorare le tecniche osservative per indagare tutte le componenti fisiche dello spazio nei modi più adatti a rivelarle nelle loro specifiche caratteristiche. Queste immagini complementari della materia cosmica si combinano a darci un quadro molto più ricco di quello disponibile all'inizio di questo secolo, ancora basato su un Universo costituito dal Sole con i suoi pianeti, tra cui la Terra, e le lontane stelle. Oggi tra le componenti rilevanti della materia cosmica annoveriamo le nebulose gassose, il gas e le polveri interstellari, le galassie, il gas intergalattico, i raggi cosmici, i campi magnetici, il fondo di radiazione fossile primordiale. Tali componenti appaiono interagire costantemente fra loro, con dinamiche spesso molto violente.

Abbiamo infine forti indicazioni indirette, in parte osservative in parte teoriche, che altre componenti di importanza non trascurabile siano ancora da scoprire: per ora ne vediamo solo i segni attraverso alla loro influenza gravitazionale sulla dinamica delle aggregazioni a grande scala. La loro caratteristica più inquietante è di essere «oscure», cioè incapaci di emettere o di interagire con la radiazione elettromagnetica: e poiché le osservazioni della radiazione sono l'unico modo che abbiamo di misurare oggetti a distanze cosmiche, ecco che lo studio di questa «materia oscura» rappresenta un vero problema. Ma, come gli astronomi del secolo scorso non avrebbero mai pensato di osservare al di fuori della luce visibile o attraverso a telescopi orbitanti nello spazio, prima o poi si individuerà il modo di studiare e misurare anche questa componente cosmica, che forse potrà gettare nuova luce sugli interrogativi universali.

2. Le immagini globali

Oggi possiamo disegnare «mappe» dell'intero cielo egualmente profonde e complete su tutta la banda dello spettro elettromagnetico, dalle onde radio (con frequenze di alcuni MegaHertz) ai raggi gamma (con frequenze di 10^{18} Hertz). In fig. 1 abbiamo un confronto del cielo nelle diverse bande elettromagnetiche; le immagini rappresentano il cielo utilizzando le *coordinate galattiche*, in cui la fascia equatoriale è occupata dalla cosiddetta Via Lattea o Galassia, l'aggregazione di 100 miliardi di stelle a forma di disco cui appartiene il nostro Sole, con al centro la costellazione del Sagittario. Fuori dal disco si guarda verso oggetti esterni al nostro sistema, cioè, come si usa dire, verso le galassie esterne, altre aggregazioni stellari altrettanto ricche, e anche più in certi casi. Le mappe che ora discuteremo sono opportunamente codificate in falsi colori in modo da apparire equivalenti a immagini fotografiche.

1. *L'immagine radio a 21 cm* (fig. 1a). Questa mappa del cielo radio mostra la nostra Galassia ad una specifica lunghezza d'onda emessa dagli atomi di idrogeno neutro. Rappresenta quindi la distribuzione del maggior componente chimico, l'idrogeno, del gas interstellare diffuso attraverso tutto il disco della Galassia.

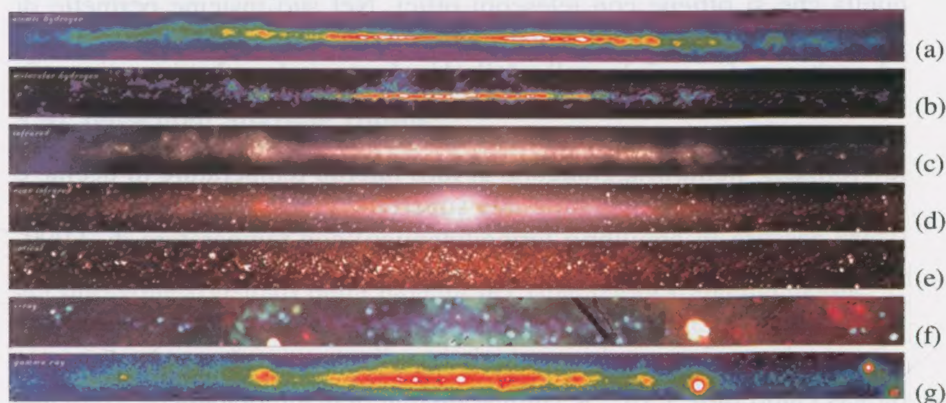


Figura 1 – L'immagine del cielo nelle diverse bande elettromagnetiche nel sistema delle coordinate galattiche, in cui la fascia equatoriale è occupata dalla Via Lattea, con al centro la costellazione del Sagittario. Fuori dal disco si guarda verso le galassie esterne. Le immagini sono codificate in colori in modo da apparire equivalenti a immagini fotografiche. Dall'alto al basso: (a) Emissione nella banda radio a 21 cm da elettroni relativistici. (b) Emissione molecolare da nuvole di gas freddo. (c) Emissione infrarossa da polveri e molecole. (d) Emissione infrarossa da stelle. (e) L'immagine ottica tradizionale, prodotta dalle stelle. (f) Emissione a raggi X da stelle molto calde e/o in violente fasi di attività. (g) Emissione da gas interstellare freddo che irraggiato da raggi cosmici produce pioni che decadono in fotoni di alta energia.

2. *L'emissione delle molecole* (fig. 1b). La componente più fredda del gas interstellare può essere osservata attraverso l'emissione della materia allo stato molecolare. Indica la presenza di nuvole di gas concentrate sul disco, probabilmente in stato di collasso gravitazionale che le porterà verso la formazione di nuove stelle.

3. *Il cielo infrarosso* (fig 1c). L'immagine illustra l'emissione termica da polveri interstellari con temperature di 10-100 °K (nella banda intorno ai 100 micron), oppure da molecole per temperature oltre i 100 °K (nella banda intorno ai 10 micron). Esiste anche una componente diffusa debole prodotta dalle polveri del nostro sistema planetario, residuo della nebulosa primitiva, riscaldate dal Sole.

4. *Le stelle infrarosse* (fig. 1d). L'osservatorio orbitante IRAS, operando specificamente nella banda intorno ai 10 micron è stato in grado di catalogare circa 250 000 sorgenti puntiformi stellari (stelle fredde di sequenza principale e giganti rosse) e circa 25 000 galassie. Questi dati si aggiungono alla mappa delle polveri, ma si riferiscono ad una ben precisa lunghezza d'onda in grado di rivelare le stelle.

5. *L'immagine ottica* (fig. 1e). È l'immagine del cielo tradizionale, quella che si ottiene con telescopi ottici. Nel suo insieme permette di vedere essenzialmente gli oggetti più «normali», gli stessi che vediamo ad occhio nudo, cioè le stelle della Via Lattea e le galassie esterne. Si tratta di stelle nelle loro fasi evolutive a scala temporale più lunga, quando il loro irraggiamento è alimentato dalle reazioni termonucleari: le «fornaci» stellari raggiungono al loro interno temperature di decine e centinaia di milioni di gradi e alla superficie emettono come corpi neri (sfere gassose in equilibrio termodinamico) con temperature di 2 000-40 000° K (gradi assoluti), corrispondenti ad emissione nel visibile, con frequenze $\nu \sim 10^{14 \div 15}$ Hz.

6. *Il cielo X* (fig. 1f). Questa emissione ad alta frequenza proviene da gas caldo oltre i 10^6 °K (probabilmente gas intergalattico), o da una distribuzione di sorgenti compatte non risolte; oggi si pensa che ambedue le componenti siano necessarie per spiegare i dati osservativi (spettrali). Si noti come in questa banda l'emissione sia più intensa fuori dal piano galattico a causa dell'assorbimento interstellare sui raggi X prodotto dal mezzo interstellare. L'emissione da sorgenti specifiche proviene da corone stellari, stelle di neutroni, buchi neri, resti di esplosioni di supernova, galassie esterne, nuclei galattici attivi. Si tratta in ogni caso di emissioni essenzialmente termiche, spesso in condizioni di campi gravitazionali molto intensi.

7. *Il cielo gamma* (fig. 1g). Corrisponde all'emissione da gas interstellare freddo che diffonde raggi cosmici, con creazione di pioni che decadono in fotoni di alta energia. Anche in questo caso l'emissione proviene dunque dalle regioni di alta densità interstellare. Sono individuabili alcune sorgenti compatte galattiche (stelle di neutroni e buchi neri, Geminga), e sorgenti estese galassie attive, blazar.

8. *Il cielo di COBE.* Il satellite COBE (COsmic Background Explorer) è stato in grado di misurare il fondo di radiazione fossile del big-bang, da cui si è originato l'Universo, e le sue anisotropie con un'accuratezza $\Delta T \sim 10^{-5}$ °K. Si ricordi che tali misure permettono di valutare l'esistenza di disomogeneità del big-bang al tempo dell'ultimo scattering dei fotoni dalla materia prima del disaccoppiamento.

9. *I raggi cosmici.* La componente corpuscolare dei raggi cosmici (relativistici) misurabile a Terra con contatori di vario tipo, è poco indicativa delle sue sorgenti, in quanto fortemente influenzata dal campo magnetico galattico: le particelle cosmiche sono cariche elettricamente e quindi vengono deviate dai campi magnetici, col risultato che la loro direzione di arrivo sulla Terra non è più correlata con la direzione della sorgente. Tale componente è stato il primo indice dell'esistenza di fenomeni astrofisici capaci di accelerare particelle ad altissime energie con distribuzione spettrale non-maxwelliana.

3. Il Telescopio Spaziale Hubble

Le tecnologie osservative hanno avuto ad oggi il loro culmine nella creazione del Telescopio Spaziale Hubble (HST), un vero e proprio osservatorio permanente, posto in orbita dallo Space Shuttle nel 1990 e già due volte rivisitato dalla navetta per riparazioni e manutenzione. È dotato di un telescopio di 2,4 metri per osservazioni nelle bande ottica, ultravioletta e infrarossa, e di vari rivelatori che non fanno fotografie nel senso tradizionale della parola, ma trasmettono a Terra le informazioni su ciascun fotone che giunge nel telescopio. Essendo posto al di fuori dell'atmosfera terrestre, HST permette di scandagliare il cielo a profondità ben superiori a qualunque telescopio terrestre. Mentre il nostro occhio giunge a registrare stelle fino alla 6ª grandezza e il telescopio di 5 metri di Monte Palomar si spinge fotograficamente fino alla 28ª grandezza, HST permette di andare oltre la 32ª grandezza: si può dire che è in grado di vedere oggetti 50 volte più deboli di qualunque telescopio a Terra, e quindi di estendere il nostro orizzonte di circa 7 volte. Anche la nitidezza dell'immagine è enormemente aumentata: possiamo

vedere dettagli oltre 2 volte più piccoli di quelli osservabili da Monte Palomar.

Le immagini che ci giungono da questo osservatorio permanente, in grado inoltre di osservare 24 ore al giorno, sono non solo nuove, ma soprattutto affascinanti per i dettagli che ci forniscono su oggetti che fino a ieri ci apparivano solo come macchie luminose informi. Con quei dettagli gli astronomi sono in grado di calibrare i modelli interpretativi e proporre nuove ipotesi di studio.

Nel quadro di questa breve presentazione commentiamo solo alcune delle novità che stanno emergendo dalle osservazioni di HST e di altri strumenti in altre bande elettromagnetiche.

Sistemi planetari. Uno dei sogni dell'umanità è sempre stato quello di scoprire pianeti extrasolari, non solo nella speranza di visitarli, ma anche di trovare altri compagni di esistenza. Rivelare pianeti è difficile, perché la loro debole luce riflessa si perde nell'alone luminoso della stella intorno a cui orbitano. Non siamo ancora giunti, neppure con HST, ad osservare direttamente altri sistemi planetari: esistono programmi specifici che verranno messi in atto nei prossimi anni, basati su osservazioni nella banda infrarossa, nella quale il rapporto di luminosità tra stella e pianeti è meno sfavorevole.

Già oggi, lavorando nell'ottico, HST ha però rivelato dischi di polveri fredde intorno ad alcune stelle appena formatesi: proprio come prevedono le moderne teorie che peraltro discendono dalla teoria della nube proto-planetesimale di Kant e Laplace. Per lo più questi dischi appaiono stagliarsi scuri contro la luce riflessa dal mezzo interstellare intorno alle protostelle, oppure essi stessi riflettono vividamente la luce stellare, quando l'orientamento è particolarmente favorevole. La fig. 2 presenta alcuni esempi particolarmente interessanti. Dunque se esistono dischi, esisteranno più tardi pianeti. E in alcuni casi questi pianeti saranno abitabili anche dall'uomo. O forse sono già abitati?

Stelle. Il maggior contributo di HST nell'astronomia stellare sta nell'osservazione di ammassi stellari dove impossibile è da Terra distinguere le singole stelle le cui immagini allargate dalla rifrazione atmosferica si sovrappongono. Così nuove classi di stelle sono state osservate in ammassi aperti, migliorando le nostre informazioni sull'evoluzione stellare.

Un altro contributo importante viene dalla possibilità di studiare con buona risoluzione le zone circumstellari dove i venti stellari interagiscono con il mezzo interstellare. Si hanno così dati del tutto nuovi sulla perdita di massa delle stelle, che ne influenzano le proprietà osservative e i cammini evolutivi.



Figura 2 – Dischi protostellari osservati con HST.

Galassie. L'attuale «geografia» dell'Universo è rivolta al conteggio delle galassie negli spazi profondi, per ricostruire l'immagine tridimensionale della distribuzione della materia visibile. Il contributo di HST è ovviamente essenziale, in quanto, come detto, la sua grande sensibilità ci permette di estendere il nostro studio a spazi 7 volte più lontani. Un esempio di osservazioni al limite di HST è dato in fig. 3: praticamente nessuno degli oggetti in questa immagine, che sono galassie, è visibile ad alcun telescopio a Terra. Si tratta di un piccolo campo di vista studiato al massimo della sensibilità di HST, e prende il nome di Hubble Deep Field, il campo profondo di Hubble.

In particolare si stanno rivelando molte più galassie di quanto ci si aspettasse anche a quelle distanze. Va ricordato che, data la finitezza della velocità della luce, guardare lontano in astronomia vuol infatti dire guardare anche indietro nel tempo. La nuova popolazione di galassie, cosiddette «galassie blu» per la loro giovane componente stellare, sono quindi galassie che noi vediamo com'erano decine di miliardi di anni fa, quindi praticamente all'inizio dell'Universo. Si pensa di conseguenza si tratti proprio di galassie primordiali.

Questo risultato ha anche implicazioni molto importanti circa la conoscenza dell'evoluzione delle galassie, di cui ancora sappiamo molto



Figura 3 - Galassie nell'Hubble Deep Field.

poco, in quanto tutte quelle vicino a noi sono già «vecchie» e apparentemente di nuove oggi non se formano più perché non esiste più molto gas diffuso da cui possano condensarsi.

Galassie attive. Sempre nell'ambito dello studio dell'evoluzione delle galassie appaiono occupare un ruolo importante le cosiddette «galassie attive», che pur rappresentando meno dell'1% di tutte le galassie conosciute, costituiscono molto probabilmente fasi di intensi cambiamenti strutturali. Sono galassie attive le radiogalassie, che emettono nel radio quanto e più che nell'ottico, i quasar, oggetti galattici molto potenti per lo più molto distanti e quindi primordiali, i blazar, galassie molto rapidamente variabili. In molti casi, ma soprattutto nel caso delle radiogalassie, questi oggetti esprimono la loro grande potenza con l'espulsione di getti di materia da altissime velocità, vicine anche alla velocità della luce, sempre nella stessa direzione e per periodi di centinaia di milioni di anni.

Le galassie attive si differenziano dalle galassie normali soprattutto per la loro potenza, che è pari fino a 1000 volte quella della nostra Galassia. Inoltre essa proviene dal nucleo centrale della galassia, da regioni poco più grandi del nostro sistema solare. Quale macchina mostruosa riesce ad essere così potente e così piccola? Neppure le reazioni termonucleari, che pure riescono a far funzionare le stelle, sono adeguate a tale scopo. L'unica alternativa, in base alle nostre attuali conoscenze fisiche, è che si tratti di giganteschi vortici cosmici in cui materia cade entro buchi neri liberando energia potenziale gravitazionale nel parossi-



Figura 4 – Disco di accrescimento nel nucleo della galassia attiva NGC 4261 rivelato da HST.

stico scontro di flussi relativistici verso l'orizzonte gravitazionale. Questo appare essere il meccanismo energeticamente più efficiente, ma ancor poco lo conosciamo: e non lo possiamo sperimentare in laboratorio, per il rischio stesso di venirne inghiottiti.

Il vortice intorno ai buchi neri è stato infine visto da HST: la fig. 4 è incredibilmente vicina a quanto fino a ieri appariva una fantasia ardita di teorici.

Getti supersonici da stelle e galassie attive. La simmetria sferica tolemaica è ormai ben lontana: le immagini di HST e delle antenne radioastronomiche ci mostrano l'esistenza di strutture collimate a velocità supersoniche sia nel caso di stelle sia di galassie. Si tratta di strutture molto stabili, al di là di quanto prevedibile in termini della normale fluidodinamica.

Getti e dischi di accrescimento sembrano necessariamente collegati in molti oggetti astrofisici. Fin dai tempi di JEANS si era immaginato che la contrazione gravitazionale di nuvole primitive sia alla base della formazione delle stelle e prima ancora delle galassie. Oggi vediamo che ciò avviene in modo dinamicamente molto speciale.

La fisica nonlineare dei getti supersonici, le loro instabilità, la transizione caotica verso stati turbolenti è ancora in gran parte sconosciuta, anche se oggi simulabile su supercalcolatori. Sono riportati in fig. 5 alcuni esempi di studi prodotti dal gruppo di ricerca teorica sui plasmi astrofisici che lavora presso l'Università e l'Osservatorio Astronomico di Torino. Un convegno tenutosi a Torino nel Dicembre 1996 ha raggruppato i maggiori esperti di tutto il mondo su tale argomento. Si sono trattate, sia dal punto di vista teorico sia osservativo, le maggiori questioni sulla fisica dei getti: origine, propagazione, irraggiamento, terminazione. Quali osservazioni future? Dal Febbraio del 1997 è in orbita HALCA, un satellite radio capace di fare osservazioni interferometriche combinandosi con antenne a Terra, raggiungendo risoluzioni angolari ~ 10^{-5} minuti d'arco, che permette di studiare l'inizio della fase di accelerazione dei getti nel profondo del disco di accrescimento dei nuclei galattici. Nel frattempo più casi verranno mano a mano raccolti da HST e molti spettri di blazar saranno prodotti dal satellite X italiano SAX. Nel futuro anche la banda gamma avrà un nuovo satellite, GLAST, in grado di rivelarci le forme e gli spettri di blazar.

La materia oscura. Abbiamo detto sopra che l'insieme dei dati sulla dinamica delle galassie e dei sistemi di galassie suggeriscono che, oltre alla materia visibile, l'Universo contenga pure una quantità ancora maggiore di materia di tipo diverso, forse neutrini massivi oppure tachioni o comunque particelle con debolissima interazione elettromagnetica con

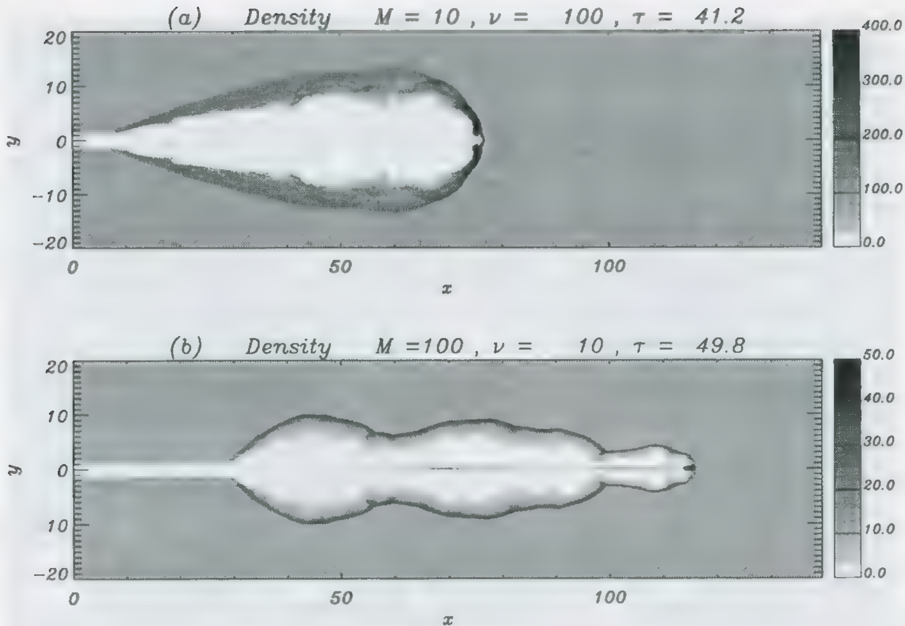


Figura 5 – Simulazioni numeriche della formazione di getti extragalattici. Le diverse strutture, che sono prodotte dall'interazione tra un getto collimato supersonico e l'ambiente esterno, dipendono dal diverso rapporto di densità tra il getto e l'ambiente (Gruppo di Astrofisica Teorica dell'Università e dell'Osservatorio Astronomico di Torino).

la materia visibile, ma agente attraverso il campo gravitazionale. Anche in questo campo HST sta dando contributi importanti.

Uno degli effetti più curiosi scoperti recentemente è quello della lente gravitazionale, proposta sulla base della relatività generale einsteiniana. Poiché i fotoni subiscono l'effetto del campo gravitazionale (si muovono su geodetiche che seguono la curvatura dello spazio deformato dal campo), è pensabile che fotoni provenienti da galassie lontane possano essere deviati dal campo di altre galassie più vicine, in primo piano. In particolare, se le galassie, quella lontana e quella vicina, sono allineate o vicine all'allineamento rispetto all'osservatore terrestre, l'immagine della galassia sullo sfondo ricevuta a Terra sarà deformata e sdoppiata in più immagini in quanto la galassia in primo piano funziona da lente. Non solo l'immagine viene deformata, ma anche rinforzata, proprio come in una lente focalizzante. Dalle caratteristiche della deformazione si può giungere alla valutazione delle proprietà della lente, alla sua massa nel caso di una lente gravitazionale.

Guardando a galassie lontane si può dunque avere un'indicazione

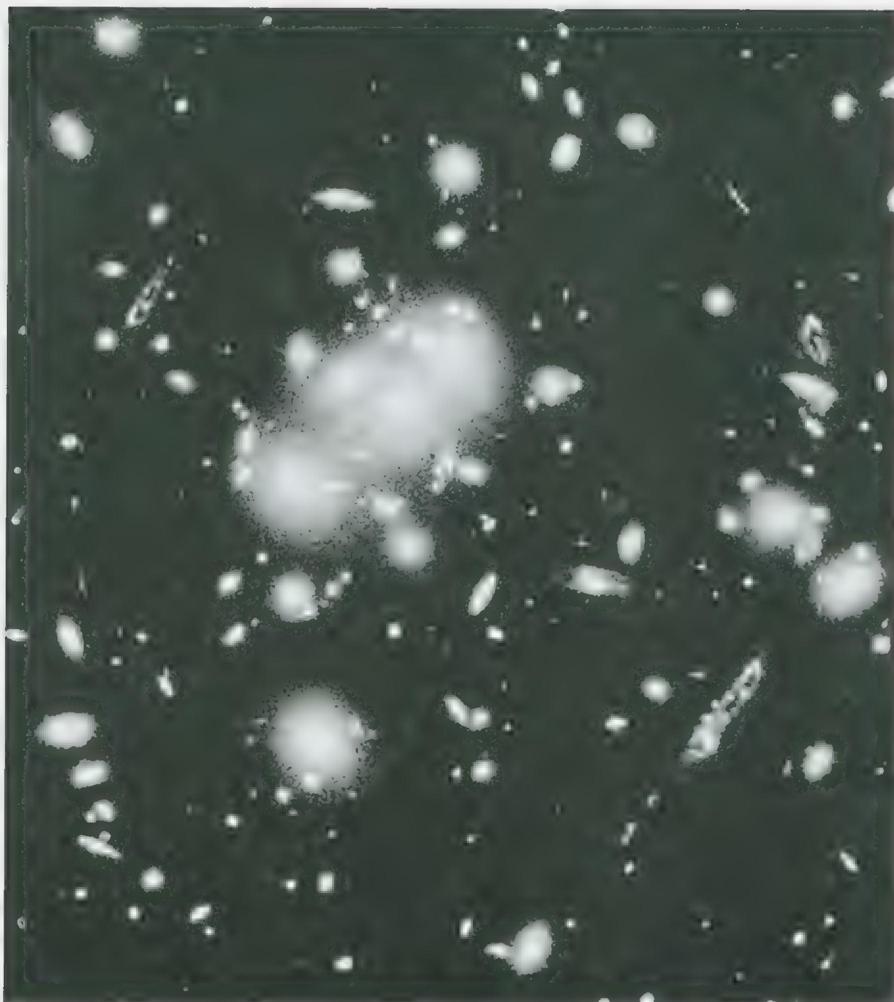


Figura 6 – Effetto di lente gravitazionale prodotto da un ammasso di galassie su una sorgente lontana: l'immagine della sorgente si dissolve nei deboli filamenti ad arco osservabili ai bordi della fotografia (da HST).

sulla quantità di massa gravitazionale tra noi e la galassia. Questa massa può essere concentrata in galassie oppure essere diffusa sotto forma di materia oscura. La fig. 6 di HST mostra l'effetto di lente gravitazionale prodotto da un ammasso di galassie su una sorgente lontana, che risulta deformata in una serie di filamenti ad arco. La massa che è necessaria per produrre quella deformazione è 10 volte più grande di quella che è concentrata nelle galassie: ecco il segno della presenza di materia oscura.

4. Conclusione

Spesso si parla di rivoluzione copernicana per indicare il passaggio concettuale che sostituì il Sole alla Terra come centro dell'Universo. Questa rivoluzione non è ancora finita: agli inizi di questo secolo ci siamo scoperti lontani dal centro della Galassia, e più avanti abbiamo scoperto che la nostra non è che una Galassia comune fra miliardi di altre. E stiamo ancora cercando l'immagine globale dell'Universo che però sembra sempre allontanarci dal centro dell'Universo aprendosi su nuovi grandiosi orizzonti, non solo nello spazio ma soprattutto nel tempo.

I risultati della ricerca astronomica sembrano spesso dirci che siamo un «accidente» per nulla speciale nell'Universo: la Terra è un minuscolo pianeta intorno ad una insignificante stella in un angolo remoto di una comune galassia, e così via. E quanto durerà la nostra «civiltà»? Secondo una teoria statistica sviluppata dall'astronomo americano GOTT, basata proprio sul principio della nostra non-eccezionalità nello spazio e nel tempo, l'umanità non sopravviverà all'infinito, a meno di trasferirsi presto a popolare la galassia. Ma non ce la faremo mai a raggiungere le stelle se non svilupperemo rapidamente le nostre tecnologie: il tempo che ci rimane non può essere molto superiore a qualche millennio, poi l'umanità rischierà di scomparire!

Eppure, pur da questa nostra insignificante posizione, siamo già stati capaci di giungere alla conoscenza progressiva della struttura dell'Universo in regioni irraggiungibili: le nostre capacità, il nostro *animus*, ci hanno permesso di uscire dal paradiso terrestre e sopravvivere alle rivelazioni della conoscenza. Abbiamo sofferto, ma abbiamo usato il nostro libero arbitrio in modo egregio. Forse ciò ha a che fare con un principio antropico? Forse dopo tutto l'Universo è stato fatto a nostra misura? Oppure ne esistono infiniti altri che noi non potremo mai conoscere perché in essi l'Uomo non potrebbe realizzarsi.

È questo l'eterno dilemma dell'umanità. Dovremo ancora raccogliere molti dati per tentare una soluzione; per ora, intanto che lavoriamo, deliziamoci di investigare l'Universo nelle sue meraviglie, dalle ardite vette del Cervino di fronte al Gornergrat ai getti supersonici delle galassie ai limiti ultimi dello spazio profondo.

Acc. Sc. Torino - Quaderni
7 (1998), 17-36, 16 ff.

Frattali, catastrofi e leggi di scala nella meccanica dei materiali

Alberto CARPINTERI (*)

1. Effetti di scala sulla fragilità delle strutture

Il fenomeno della *frattura* dei materiali si realizza a differenti scale, in dipendenza anche della microstruttura dei materiali stessi, e si evolve dall'ambito microscopico a quello macroscopico passando attraverso una sequenza di stadi intermedi [1,2]. È per questa ragione che lo studio della frattura risulta essere marcatamente interdisciplinare, coinvolgendo nel suo approfondimento esperti di diversi settori: dalla Fisica dello Stato Solido alla Scienza dei Materiali, sino all'Ingegneria Strutturale.

La *scala dimensionale* risulta peraltro un fattore fondamentale per comprendere le leggi naturali che governano il fenomeno della frattura. Al variare della scala dimensionale su più ordini di grandezza, si producono infatti risultati sperimentali assolutamente inspiegabili sulla base delle teorie tradizionali. Sorprendenti risultano essere i casi sia delle *navi Liberty*, i cui scafi in acciaio si sono frequentemente spezzati in due parti in modo estremamente fragile, seppur soggetti a sollecitazioni non eccessive, a fronte di un materiale caratterizzato come duttile e resistente, sia dei filamenti vetrosi con cui si rinforzano i materiali, i cosiddetti *whiskers*, che si piegano come la gomma e mostrano resistenze che sono anche di cento volte superiori a quelle rilevate su campioni di dimensioni più usuali [3].

Come è evidenziato dai due casi estremi appena richiamati, la resistenza, così come la duttilità, non sono in realtà caratteristiche invarianti del materiale, ma, tutt'altro, variano talvolta sensibilmente con la dimensione dell'oggetto. Il celebre filosofo, di recente scomparso, Karl R.

(*) Accademia delle Scienze di Torino; ordinario di Scienza delle Costruzioni, Politecnico di Torino. Conferenza tenuta il 21 Maggio 1997.

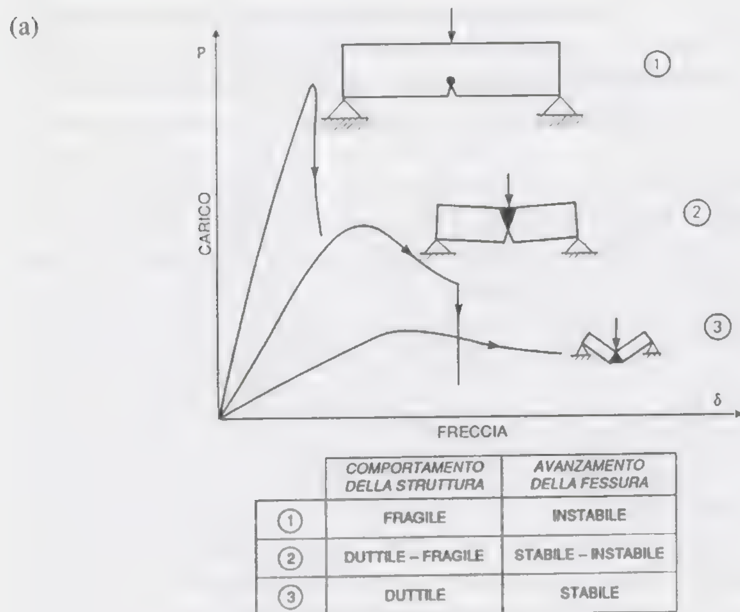
Popper catalogherebbe tali due osservazioni sperimentali come *falsificazioni* di *congetture* precedenti [4]. Per quanto riguarda la resistenza, l'ipotesi di invarianza risale ai nostri due grandi scienziati Leonardo e Galileo, che, rispettivamente nel *Codice Atlantico* e nei *Discorsi intorno a due Nuove Scienze*, per primi si occuparono della rottura dei materiali sollecitati da forze esterne.

Pur essendo le variazioni suddette particolarmente evidenti alle scale estreme (macroscopica e microscopica), esse si rivelano anche alle scale intermedie, caratteristiche dei laboratori di Ingegneria Strutturale. Nei campioni più grandi il materiale si mostra più fragile e più debole, in quelli più piccoli si mostra più duttile e più resistente. La fessura che si crea e che avanza presenta, peraltro, comportamenti assai diversi: nei campioni più grandi si propaga in modo esplosivo attraverso un materiale sostanzialmente integro ed elastico; nei campioni più piccoli tale propagazione è frenata da una estesa zona snervata ed avviene quindi lentamente (fig. 1a). La caduta verticale del carico, che si evidenzia nei diagrammi, nasconde in realtà rami altamente instabili, detti di *snap-back*. Nel diagramma tridimensionale carico-spostamento-scala dimensionale, appaiono infatti sia *fold catastrophes*, per piccole dimensioni, che *cusp catastrophes*, per grandi dimensioni (fig. 1b), secondo la terminologia introdotta da Renè Thom [5].

La fragilità viene spesso ed erroneamente interpretata come una bassa resistenza del materiale. Le due proprietà sono invece del tutto indipendenti tra loro, anche se soggette, come si è visto, ad analoghe leggi di scala. Vi sono materiali infatti resistenti, ma fragili (vetro, ceramica, ghisa, etc.), e, al contrario, materiali deboli, ma tenaci (calcestruzzo, rocce, legno, etc.) . La fragilità è infatti la propensione a rompersi, non tanto sotto sforzi ridotti, quanto in maniera improvvisa e rumorosa. Sono questi gli incidenti più pericolosi, che riguardano solitamente grandi strutture come dighe, ponti, navi, contenitori in pressione, e avvengono senza particolari preavvisi o sintomi e con enormi rilasci di energia.

La dipendenza della fragilità degli elementi strutturali dalla loro stessa dimensione è da porsi in relazione diretta con la resistenza a trazione e con l'energia di frattura, che sono proprietà del materiale che presentano dimensioni fisiche diverse: la resistenza a trazione è una forza per unità di superficie ovvero un'energia per unità di volume, mentre l'energia di frattura è una forza per unità di lunghezza ovvero un'energia per unità di superficie. È possibile dimostrare come la fragilità delle strutture sia misurabile tramite il rapporto fra l'energia di frattura e il prodotto della resistenza a trazione per la dimensione massima della struttura. Tale rapporto è un numero puro, privo di dimensione fisica,

(a)



	COMPORTAMENTO DELLA STRUTTURA	AVANZAMENTO DELLA FESSURA
1	FRAGILE	INSTABILE
2	DUTTILE – FRAGILE	STABILE – INSTABILE
3	DUTTILE	STABILE

(b)

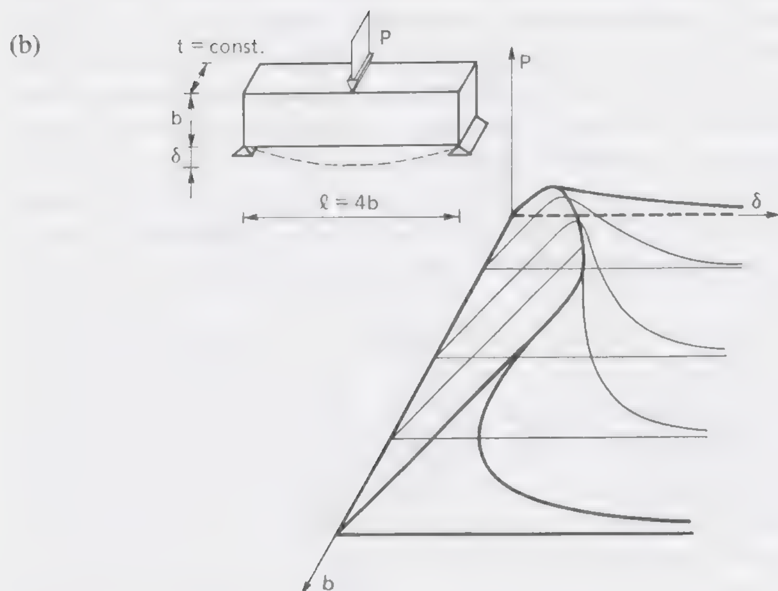


Figura 1 - (a) Diagrammi non-lineari della forza in funzione dello spostamento; (b) Rami catastrofici a pendenza positiva nel caso degli elementi più grandi.

che dipende dalla scala dimensionale dell'oggetto. In base a queste argomentazioni, possono apparire ugualmente fragili un piccolo oggetto in vetro e un grande scafo in acciaio, così come possono apparire ugualmente duttili un piccolo oggetto in acciaio e una fibra microscopica di vetro.

La variazione della risposta strutturale al variare delle dimensioni è detta «transizione duttile-fragile» ed ha dato luogo in anni recenti ad un fiorire di teorie e modelli, capaci di descrivere e riprodurre tale sorprendente fenomeno. L'evoluzione dei processi di danneggiamento meccanico può risultare intrinsecamente stabile, instabile o catastrofica. Se si immagina di sollecitare una struttura con una forza esterna, le deformazioni aumentano dapprima proporzionalmente alla forza e, in un secondo tempo, più rapidamente, diminuendo la rigidezza per effetto del sopravvenuto danneggiamento. Oltre certi livelli di danneggiamento, all'aumentare delle deformazioni è necessario diminuire la forza applicata se si vuole evitare una rottura brusca. Questa seconda fase è quella *instabile* del danneggiamento, che può essere tenuta sotto controllo, in senso elettronico, solo se pilotata dalla deformazione, che è, in questa fase, una grandezza crescente, a differenza della forza che invece decresce.

Alla fase instabile può seguire una terza fase, detta *catastrofica*, che è quella in cui una macrofessura si forma e si propaga. Mentre la fessura separa l'elemento in due parti distinte, le tensioni interne si rilassano e le deformazioni di conseguenza si riducono, così come la forza esterna continua a decrescere. La fase catastrofica può essere tenuta sotto controllo solo se pilotata dall'apertura oppure dall'estensione della fessura, essendo queste le uniche grandezze che continuano a crescere. Con l'aiuto delle moderne tecniche elettroniche di controllo automatico, è pertanto possibile fare avvenire in modo rallentato una rottura fragile.

Si può quindi concludere questo paragrafo introduttivo asserendo che, mentre gli effetti di scala sulla *fragilità* (o *duttilità*) del comportamento strutturale sono spiegabili e interpretabili nell'ambito dell'Analisi Dimensionale, considerando le diverse dimensioni fisiche di *resistenza a trazione* ed *energia di frattura*, gli effetti di scala su queste ultime stesse proprietà del materiale, considerate generalmente e tradizionalmente come invarianti con la scala, sono spiegabili e interpretabili soltanto in un ambito concettuale più ampio e non classico, che fa capo alla *Geometria Frattale* e alle *Procedure di Rinormalizzazione*. Tali teorie saranno introdotte nei paragrafi seguenti.

2. Gerarchia e disordine nelle forme naturali

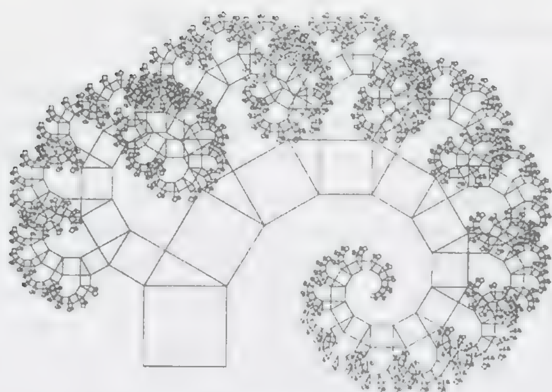
«Perché mai la Geometria è spesso definita come fredda e arida? Una ragione consiste nella sua incapacità di descrivere compiutamente la forma di una nuvola, di una montagna, di una costa marina, di un albero, o di un fulmine. Le nuvole non sono sfere, le montagne non sono coni, le coste marine non sono archi di circonferenza, la corteccia del tronco di un albero non è liscia, né il fulmine viaggia rettilineamente». Con queste parole Benoit B. MANDELBROT inizia il suo oramai famoso saggio *The Fractal Geometry of Nature* [6]. Egli osserva e rileva nel mondo naturale una serie di irregolarità, tortuosità e discontinuità, che non possono di certo venire descritte e studiate con la matematica classica. In questo senso egli si oppone a LEIBNIZ, il pensatore vissuto a cavallo del XVII e XVIII secolo, fondatore del calcolo infinitesimale, il quale soleva dire: *Natura non facit saltus*. Si scontrano perciò due mondi, due modi di pensare, proprio in questa fase di fine millennio: da una parte l'ottimismo, prima illuminista e poi positivista, dall'altra lo scetticismo di un razionalismo critico, forse disilluso, ma anche proiettato su nuovi ed entusiasmanti paradigmi.

Che la natura, pur con le sue irregolarità e anomalie, possa venire comunque descritta dalla matematica, già ce lo insegnava PITAGORA (VI secolo a. C.): «I numeri sono il principio di tutte le cose... L'intero universo è armonia e numero». Pitagora ci fornisce un primo significativo esempio di come ottenere forme complesse da geometrie elementari, tramite procedure ricorsive. L'applicazione del suo ben noto teorema, ripetuta infinite volte, fornisce una spirale logaritmica (fig. 2a), ovvero una forma ramificata (fig. 2b). Come la Matematica, con le sue astratte procedure ricorsive, produce figure geometriche estremamente complesse, analogamente la Fisica, la Chimica e la Biologia, con procedure ricorsive in questo caso reali, creano forme minerali, vegetali o animali altrettanto complesse. Si pensi, ad esempio, alle conchiglie spiraliformi, o a tutte le forme ramificate del mondo vegetale: arbusti, fiori, felci, alberi, foreste, etc.

Anche gli artisti, con procedure sinora giudicate irrazionali ma certo spesso, nel tormento della ispirazione, anch'esse di tipo ricorsivo, tentano di riprodurre la complessità della natura. Le pennellate dei pittori Impressionisti si sovrappongono, a volte in modo sistematico, a volte in modo solo apparentemente disordinato. Le note dei musicisti più famosi si inseguono senza regole apparenti, ma in modo sicuramente armonioso.

I fenomeni di crescita per diffusione e aggregazione, che sono di natura fisica, chimica e biologica, creano strutture ramificate di tipo den-

(a)



(b)

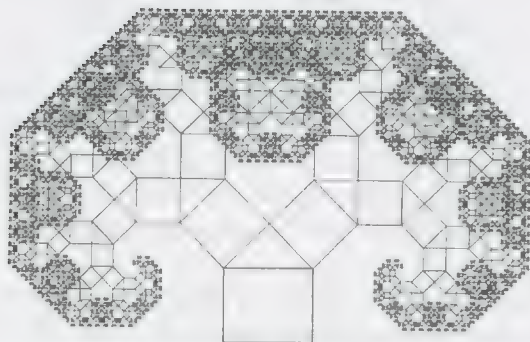


Figura. 2 - (a) Spirale logaritmica e (b) struttura arborea, ottenute applicando ripetutamente il Teorema di Pitagora.

dritico (fig. 3). Classici esempi sono rappresentati dai depositi elettrolitici, dalla diffusione di fluidi in altri fluidi, dalle scariche elettriche, dalle colonie batteriche. Ma anche gli aggregati urbani si formano e si sviluppano con regole analoghe e con risultati morfologici del tutto simili. Tanto che lo scrittore argentino Borges definisce giustamente la sua Buenos Aires negli anni della grande espansione «... una città che cresce come un albero».

Anche nel mondo animale è frequente incontrare strutture o sistemi, ramificati in modo ricorsivo. Si pensi, ad esempio nel corpo umano, al sistema dei vasi sanguigni o a quello dei bronchi, nonchè al sistema nervoso. Ciascun neurone, peraltro, può essere considerato a sua volta come un sistema complesso di tipo ramificato. Si ha cioè *autosimiglianza* tra l'intero sistema nervoso e le sue parti.

Anche le fratture che si originano e crescono sia nei corpi metallici che nelle rocce e nei calcestruzzi, presentano spesso una forma ramifi-



Figura. 3 - Struttura dedritica.

cata e autosomigliante. Ciò significa che certe caratteristiche geometriche si ripresentano a tutte le scale, tanto che può diventare difficile distinguere tra la morfologia di una faglia terrestre e quella di una microfessura dovuta a corrosione, ovvero tra una rete di fessure formatesi sul fondo argilloso e prosciugato di uno stagno e il sistema di microfessure che sorgono per contrazione impedita nella pellicola superficiale di un fluido.

Le stesse sagome delle montagne presentano morfologie a volte complesse e autosomiglianti, tanto che spesso, senza oggetti di riferimento, diventa difficile indovinare la scala dell'immagine. Si potrebbe trattare di un picco dolomitico, ma anche di un dettaglio di una pietra qualsiasi. Evidentemente la natura è affascinante a tutte le scale.

Anche le curve di livello delle montagne, che sono potenziali linee di costa per mari e oceani, presentano forme tortuose e autosomiglianti. Pure in questo caso può risultare difficile distinguere tra la linea di costa di un subcontinente, il contorno di una nuvola e il perimetro di un mucchio di sabbia appoggiato su di un piano. La costa della Norvegia, ad esempio, è sicuramente una delle più frastagliate, con le sue innumerevoli isole e i suoi profondi fiordi (fig. 4). Se qualcuno provasse a misurare la lunghezza totale di tale costa, si troverebbe di fronte ad irresolubili ambiguità. Dovrebbe infatti decidere se includere la costa delle isole più piccole e le sponde dei fiordi più profondi. Già il fisico inglese RICHARDSON aveva provato, negli anni trenta, a misurare la lunghezza delle coste della



Figura 4 - Costa meridionale della Norvegia.

Gran Bretagna, utilizzando serie di poligoni equilateri a lato decrescente. La lunghezza delle coste aumentava indefinitamente al diminuire del lato del poligono equilatero. La stessa difficoltà si incontra nel definire la lunghezza della frontiera di paesi confinanti. Dipendendo dal grado di dettaglio con cui si effettua la misurazione, è interessante osservare che, mentre ad esempio la Spagna denuncia una frontiera di 987 km, il Portogallo considera un confine di 1214 km; e così l'Olanda denuncia 380 km, contro i 449 km del Belgio.

Proprietà di autosomiglianza, e cioè di riproposizione delle medesime caratteristiche geometriche e statistiche a tutte le scale dimensionali, si presentano quindi sovente in natura, in tutti i campi e in tutti gli ambiti,

da quello microscopico (v. ad esempio le traiettorie dei moti Browniani delle particelle elementari) a quello intergalattico (stelle, galassie e ammassi di galassie si aggregano in modo autosimile).

L'autosomiglianza riguarda anche i fenomeni temporali. I grafici, riportati in funzione del tempo, della frequenza cardiaca, dell'indice di borsa o della intensità dei terremoti, si assomigliano ad ogni scala temporale. Quando i cosiddetti «fenomeni caotici», che sono aperiodici ma autosimili, modellano l'ambiente naturale, ne rimangono a testimonianza morfologie autosimili: la risacca del mare forma le linee di costa, la turbolenza atmosferica forma le nubi, i movimenti geologici formano le montagne.

Il comportamento dei sistemi dinamici caotici è imprevedibile, poiché una piccola variazione nelle cause può determinare una enorme variazione negli effetti. Il determinismo e il meccanicismo classico vengono così messi in crisi, nel momento in cui per uno stesso problema si presenta una molteplicità di soluzioni e di traiettorie. La «farfalla» di LORENZ è storicamente il primo esempio di questo tipo e descrive l'imprevedibilità delle condizioni atmosferiche. Da una parte quindi la meccanica caotica con il suo indeterminismo, dall'altra la meccanica classica newtoniana, con il suo determinismo capace di prevedere con

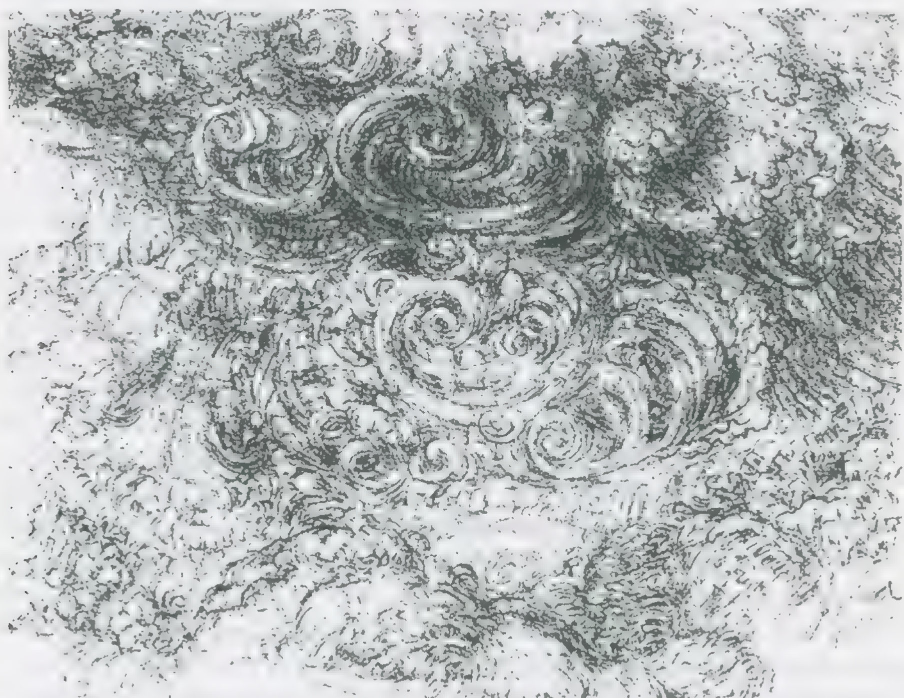


Figura 5 - «Il Diluvio Universale» di Leonardo da Vinci.

millimetrica precisione l'oscillazione di un pendolo o l'orbita di un pianeta. Tra i due mondi non vi è, peraltro, separazione completa. Anche i moti astrali appaiono caotici, a scale spaziali e temporali molto grandi, e quindi per noi inconsuete. Nello stesso modo i fenomeni atomici appaiono caotici e indeterminati a scale altrettanto inconsuete.

Un fenomeno tipicamente caotico e indeterminato alla scala dimensionale umana è quello della turbolenza dei fluidi. Dal filo di fumo di una sigaretta, che dal regime laminare passa improvvisamente a quello turbolento, ai venti atmosferici, che da regolari e sostenuti diventano improvvisamente tempestosi, molti sono gli esempi in natura di tali transizioni. Ogni fluido, gas o liquido che sia, presenta vortici e gorghi di dimensioni caratteristiche ad ogni scala, in una configurazione che è statisticamente autosimile. Già LEONARDO, nel suo *Diluvio Universale*, descriveva mirabilmente questa fenomenologia multiscala (fig. 5).

3. Autosomiglianza e frattalità nelle forme geometriche

Il fisico Luciano PIETRONERO definisce i frattali, sull'Enciclopedia delle Scienze Fisiche [7], nel modo seguente: «Il termine *frattale* (dal lat. *fractus*, «frammentato») fu introdotto nel 1975 da Benoit B. MANDELBROT per indicare un sistema che gode della proprietà di *autosomiglianza*, cioè tale che ingrandendo una qualunque parte, per quanto piccola, del sistema, essa abbia una struttura identica a quella dell'intero sistema. In generale, tale proprietà dà luogo a una *dimensione non intera*... Si deve a M. l'aver mostrato con numerosi e suggestivi esempi che concetti considerati come delle curiosità astratte costituiscono invece un apparato matematico di nuovo tipo per la descrizione delle strutture intrinsecamente irregolari». Gli fa eco il collega Giuseppe CAGLIOTI [8]: «L'avvento dei *frattali*... ha permesso di migliorare la comprensione dei processi di formazione e trasformazione delle strutture naturali, e ha offerto nuovi algoritmi per simulare ed estrapolare tali processi. La matematica dei frattali ha prodotto nuovi mezzi espressivi che sono stati ben presto riconosciuti funzionali all'avanzamento di molte discipline».

Gli insiemi frattali erano già stati considerati, in maniera episodica, da matematici di calibro come PEANO, POINCARÈ, HAUSDORFF, CANTOR, WEIERSTRASS. Essi li avevano via via definiti come mostruosi, patologici, strani, etc., benché questi siano invece i modelli più aderenti alle forme naturali. MANDELBROT ha avuto il merito di riconsiderarli in maniera sistematica, a partire dall'insieme che dallo scienziato stesso prende il nome (fig. 6). L'insieme di MANDELBROT ha un qualcosa di inquietante e angoscioso, ma anche di affascinante. Scrive ancora CAGLIOTI [8]:

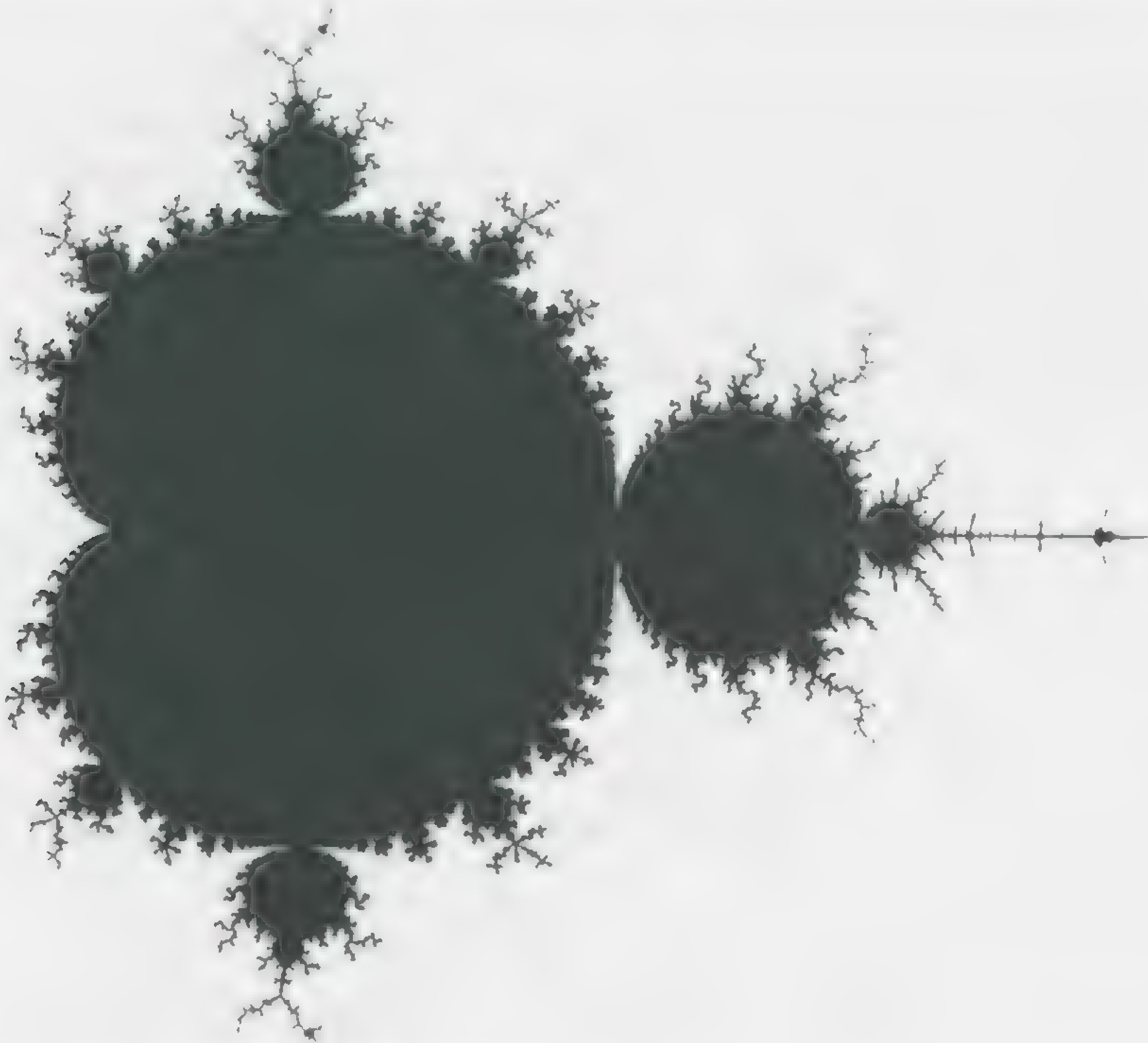


Figura 6 - L'insieme frattale di Mandelbrot.

«L'insieme di Mandelbrot ha un che di biologico: in ogni sua parte è compressa l'informazione relativa all'intera struttura dell'insieme. Analogamente, in ogni molecola del DNA di un individuo è impressa l'informazione genetica che identifica compiutamente l'individuo».

Si dicono *frattali invasivi* quegli insiemi che presentano una dimensione superiore a quella di riferimento. Il loro archetipo è rappresentato dalla *curva di von Koch* (fig. 7). Essa può costruirsi a partire da un intervallo tramite una sequenza infinita di operazioni di sostituzione del «terzo medio» con gli altri due lati del triangolo equilatero che ha base sul segmento rimosso. La lunghezza, in termini classici, della curva di von Koch è infinita. È possibile peraltro dimostrare come la *dimensione frattale* di tale insieme sia pari a 1,262, e come quindi la curva presenti misura finita solo in relazione ad una unità di lunghezza elevata a tale anomalo esponente. Va osservato come gli insiemi frattali possano presentare anche un carattere aleatorio. Ad esempio, la curva di von Koch può costruirsi riportando il triangolo equilatero al di sopra o al di sotto del segmento su cui esso ha base (fig. 8). In tal caso, rimane invariata la dimensione frattale, mentre l'aspetto finale della curva risulta più irregolare e disordinato.



Figura 7 - Curva di von Koch (dimensione frattale = 1,262)

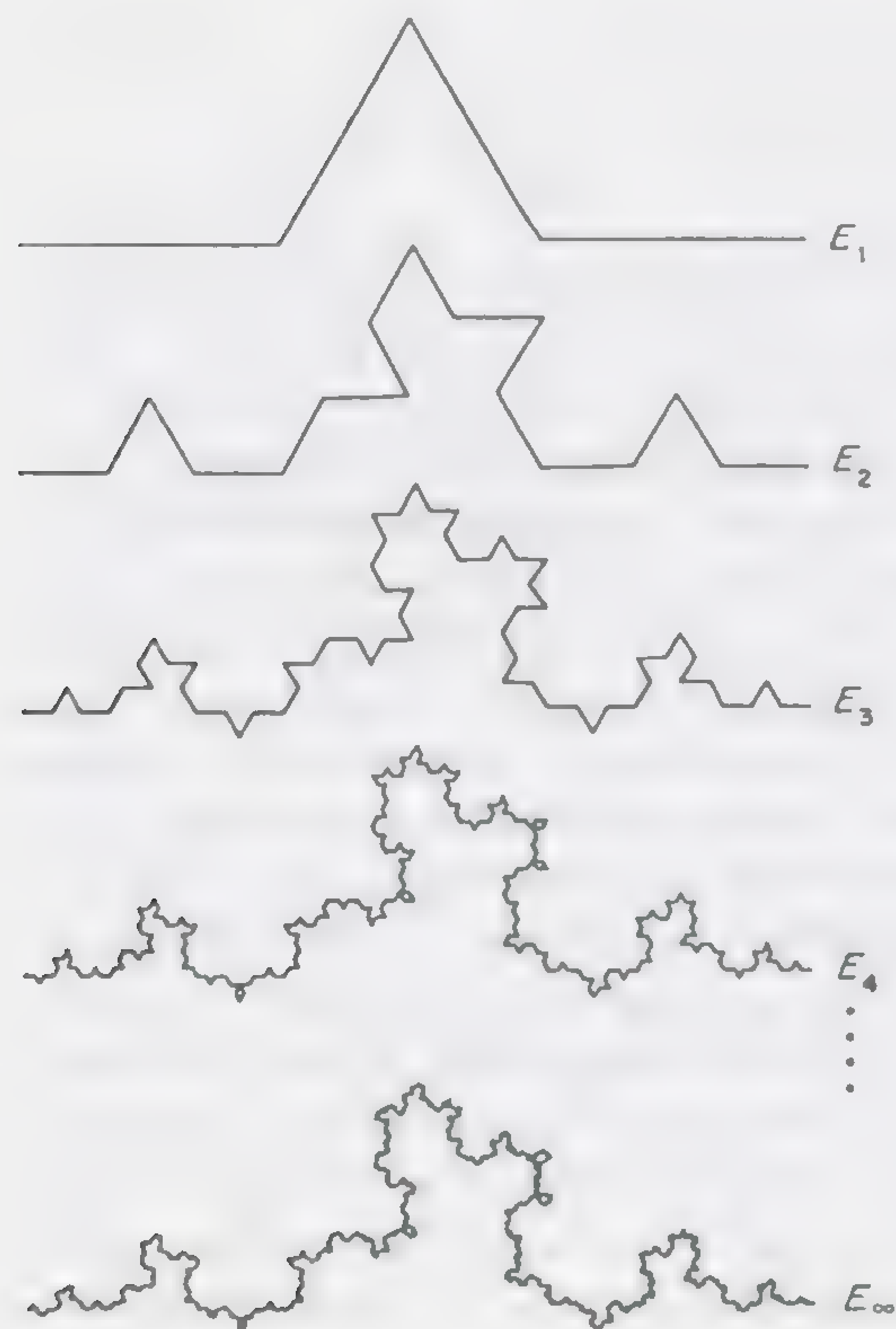
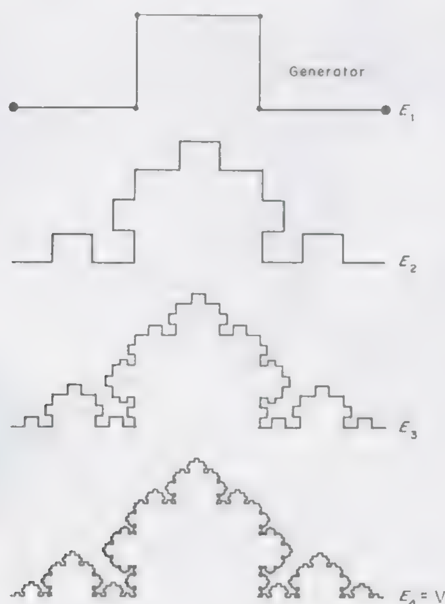


Figura 8 - Curva aleatoria di von Koch.

Utilizzando i generatori di fig. 9 si ottengono profili arabescati rispettivamente di dimensione frattale 1,34 e 1,50. Quando il generatore è particolarmente tortuoso come quello di fig. 10, già alla prima iterazione la forma appare di notevole complessità. La forma finale, dopo un numero infinito di iterazioni, rammenta quella di un cristallo di neve. Si noti l'alto valore della dimensione frattale, 1,869, che indica un quasi riempimento del piano da parte dei mille tentacoli. Esiste comunque un caso limite di curva, così ricca di tortuosità a tutte le scale, da invadere

(a)



(b)

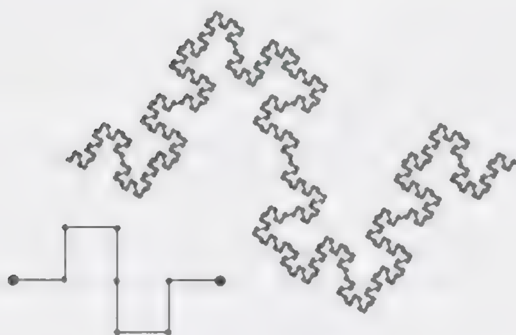
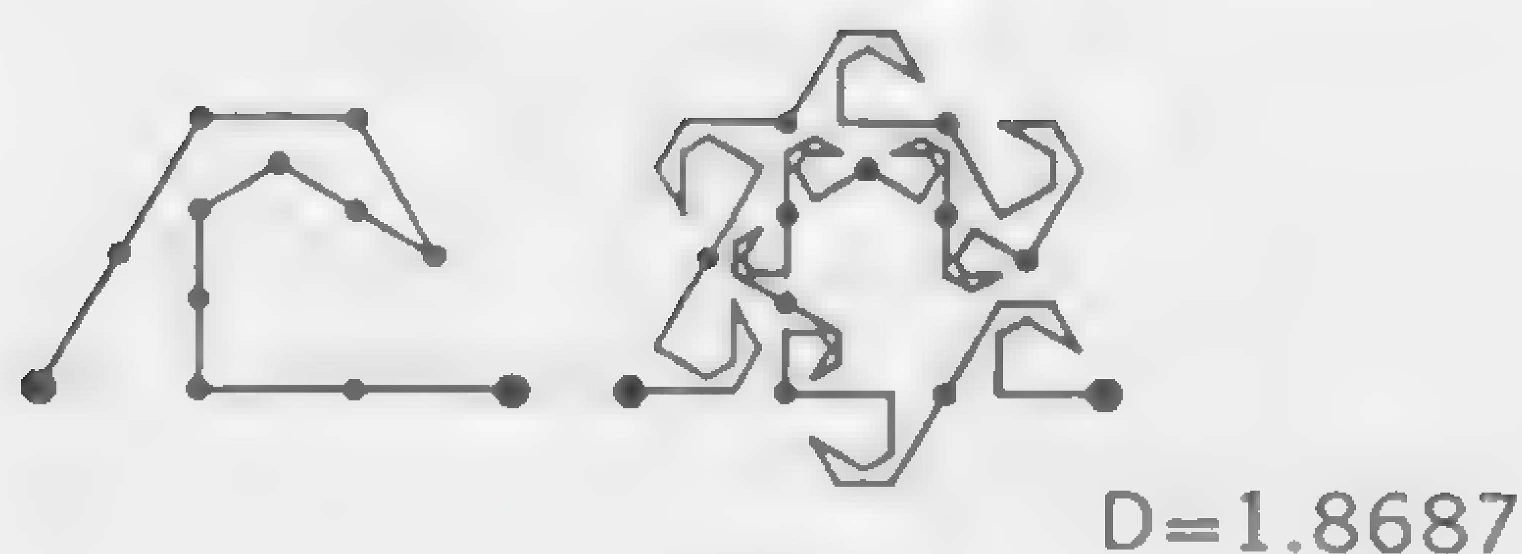


Figura 9 - Due diversi generatori che, applicati ripetutamente, producono due curve frattali di dimensione (a) 1,34 e (b) 1,50.



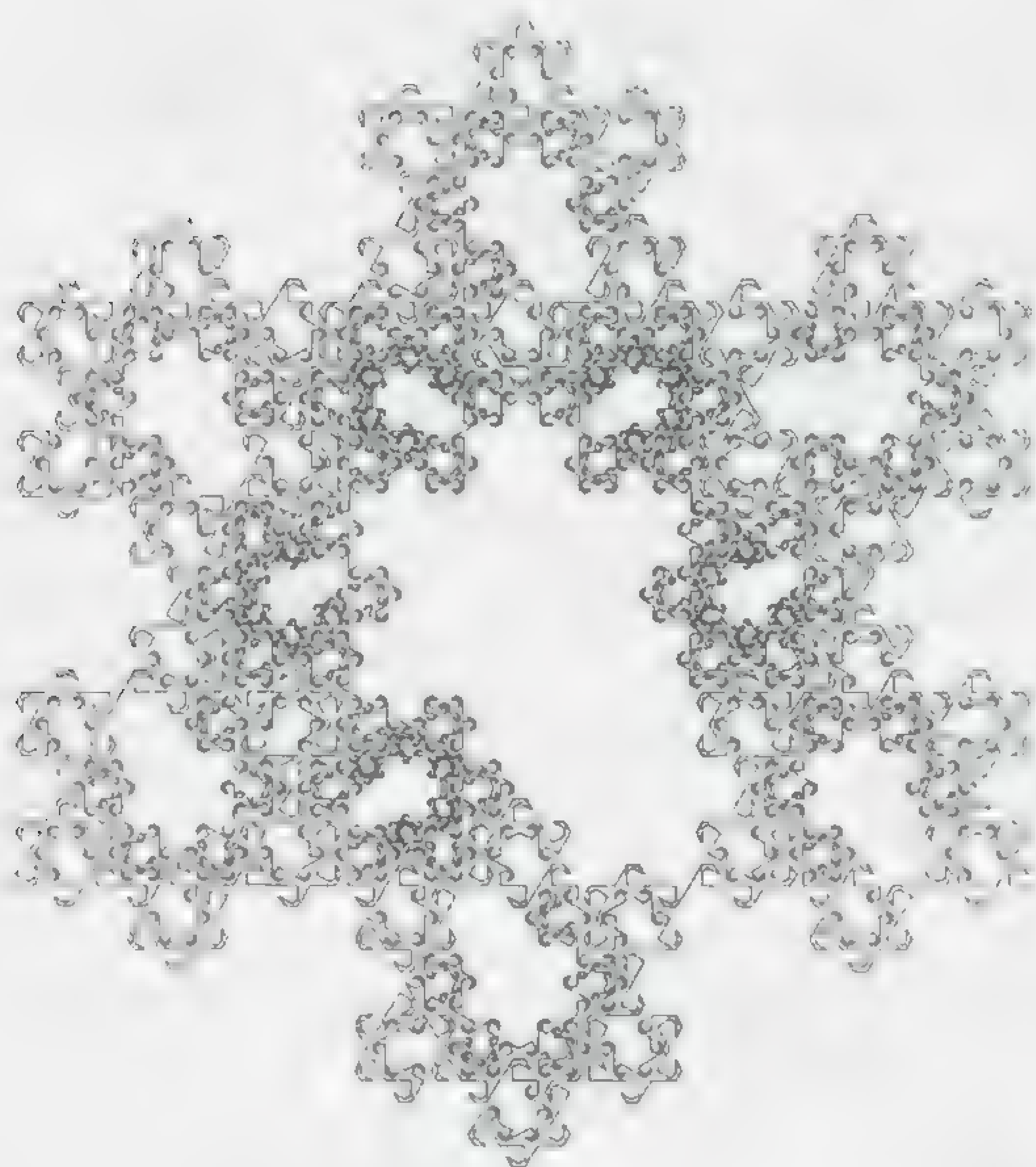
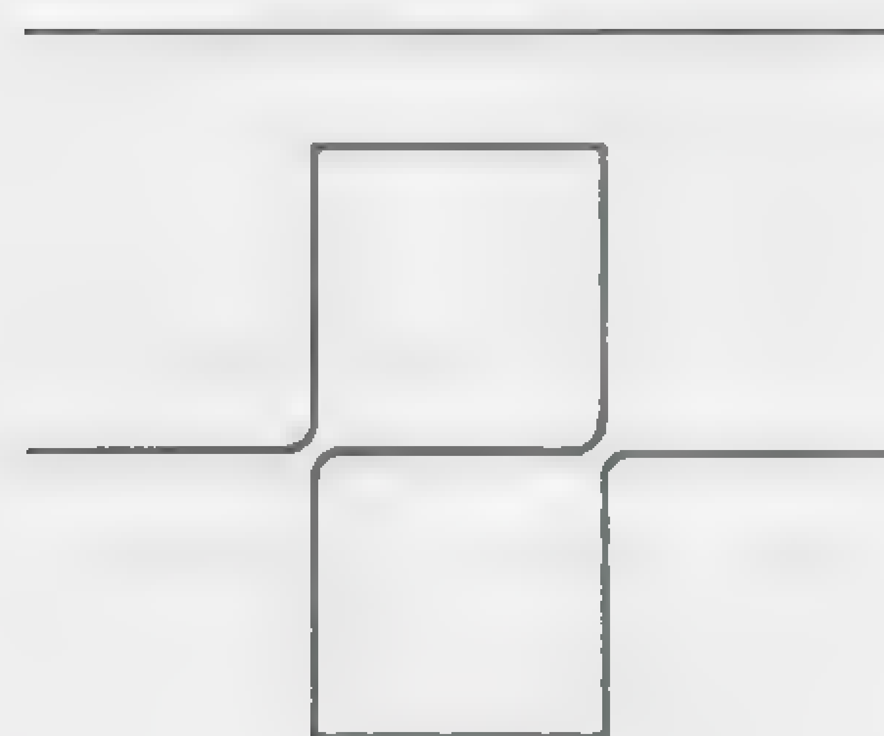
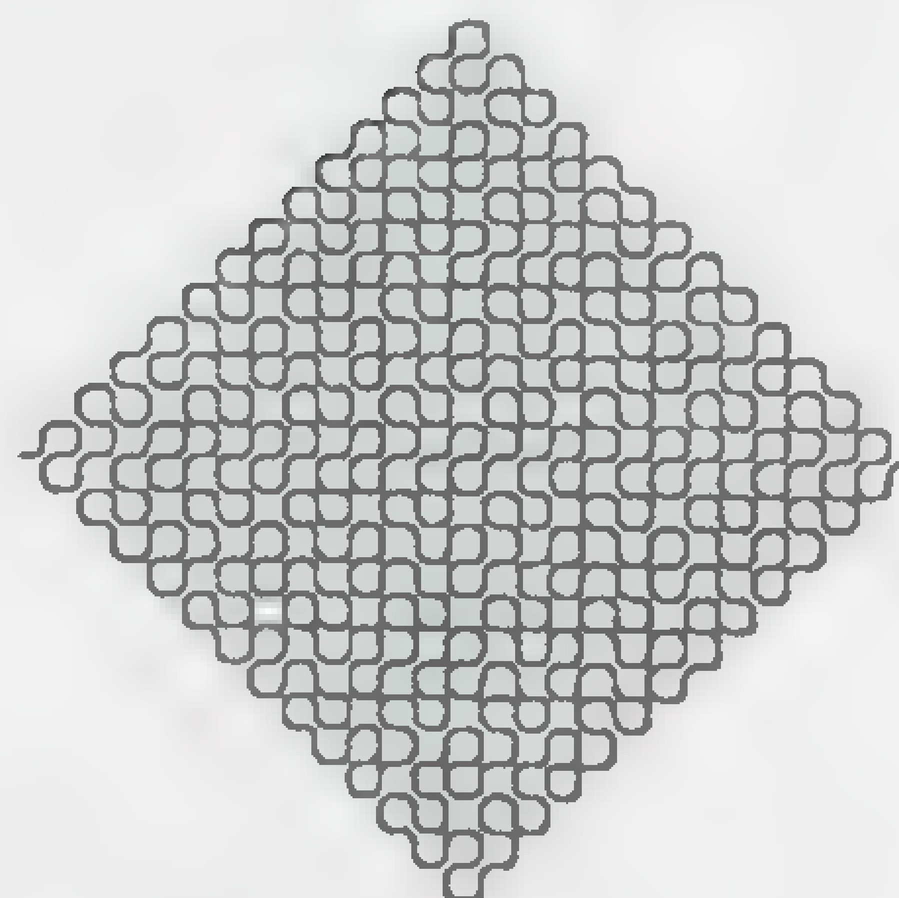


Figura 10 - Generatore particolarmente tortuoso che produce una curva frattale molto intricata (dimensione frattale = 1,87).





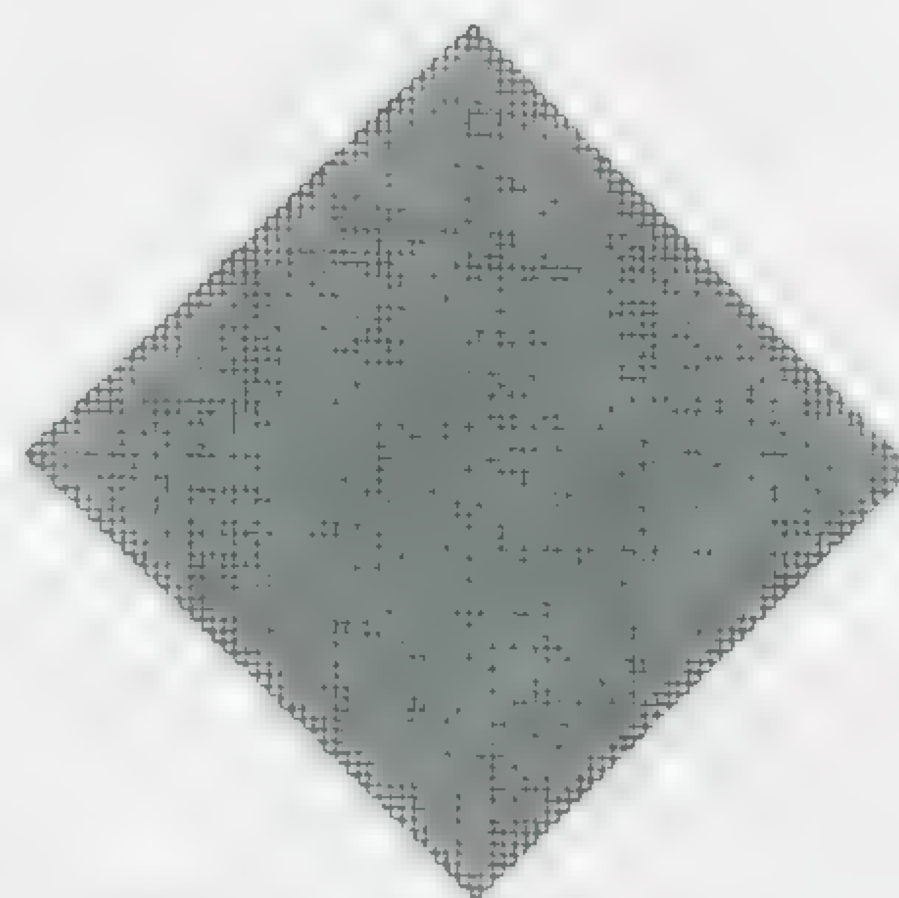


Figura 11 - Curva di Peano (dimensione frattale = 2).

completamente il piano (fig. 11). Essa è la *curva di Peano*, il cui generatore mostra due larghe anse.

È evidente l'utilità dei modelli appena illustrati per descrivere, in modo sintetico, la complessità di una traiettoria di frattura o di una distribuzione di microfessure in una sezione piana. Nello spazio a tre dimensioni, i frattali invasivi presentano una dimensione che è intermedia tra due e tre. Si tratta, cioè, di superfici estremamente scabre, con picchi e valli a tutte le scale. Se si escludono protuberanze particolarmente tortuose come quella di fig. 10, la dimensione massima che possono raggiungere le superfici frattali invasive è pari a 2,5, nel qual caso vengono dette *superfici Browniane*.

Si dicono *frattali lacunari* quegli insiemi che presentano una dimensione inferiore a quella di riferimento. Il loro archetipo è rappresentato dall'*insieme del terzo medio* (o *polvere*) di Cantor (fig. 12). Esso può costruirsi a partire da un intervallo tramite una sequenza infinita di operazioni di cancellazione. La lunghezza, in termini classici, dell'insieme del terzo medio è nulla. È possibile peraltro dimostrare come la dimensione frattale di tale insieme sia pari a 0,631, e come quindi l'insieme abbia misura finita solo in relazione ad una unità di lunghezza elevata a tale anomalo esponente.

Gli esempi in natura di strutture rarefatte come l'insieme di Cantor sono numerosi. Gli anelli di Saturno sono costituiti dalle traiettorie a carattere frattale (gli *attrattori strani* della dinamica caotica) di particelle di roccia e ghiaccio. Strutture simili, di tipo stratificato o concentrico, si ritrovano nelle formazioni geologiche. L'interpretazione tradizionale attribuisce queste strutture a fenomeni sequenziali di deposito. Più recenti interpretazioni, dovute a Ilya Prigogine [9], le attribuiscono a transizioni di fase in condizioni di non-equilibrio.

Anche nel dominio temporale, oltre che in quello spaziale, si realizzano sequenze che possono essere descritte dall'insieme di Cantor. Gli errori di trasmissione nelle telecomunicazioni presentano, ad esempio, una distribuzione rarefatta e non uniforme dello stesso tipo. Per un'intera ora, ad esempio, le trasmissioni potrebbero non mostrare errori, l'ora precedente e quella seguente essendo invece affette da errori. D'altra parte, dividendo ciascuna ora affetta da errori in tre periodi uguali di venti minuti ciascuno, ci si potrebbe accorgere che, statisticamente, solo due di questi periodi sono affetti da errori, mentre il terzo ne sarebbe esente. Dividendo ciascun periodo affetto da errori in tre parti uguali, si otterrebbe ricorsivamente una distribuzione degli errori di tipo frattale.

Nello spazio a due dimensioni, i frattali lacunari presentano una dimensione che è intermedia tra uno e due. Si tratta, cioè, di aree estre-

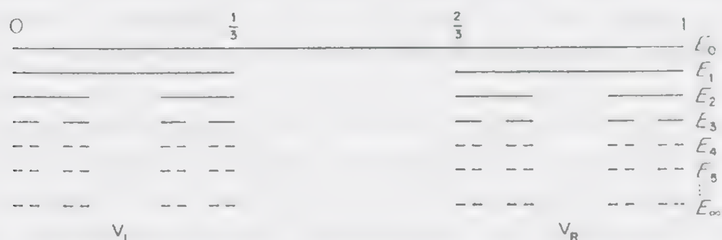


Figura 12 - Polvere di Cantor ovvero insieme del terzo medio (dimensione frattale = 0,631).

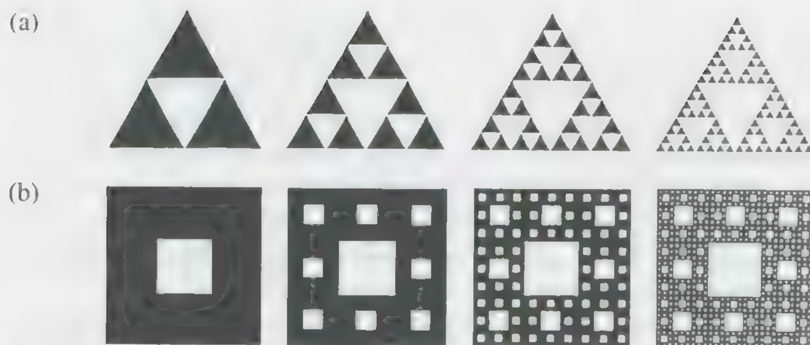


Figura 13 - (a) Guarnizione di Sierpinski (dimensione frattale = 1,58); (b) tappeto di Sierpinski (dimensione frattale = 1,89).

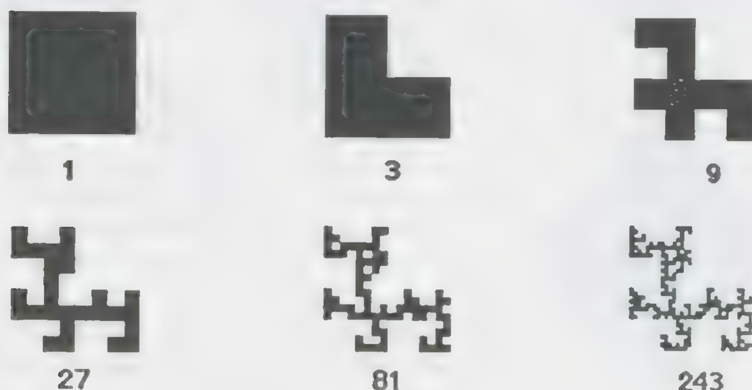


Figura 14 - Frattali lacunari di tipo aleatorio.

mamente rarefatte, con fori a tutte le scale. Due esempi tipici sono stati forniti dal matematico polacco Sierpinski: la cosiddetta «guarnizione» – ingl. *gasket* – (fig. 13a) presenta dimensione 1,58, mentre il cosiddetto «tappeto» – ingl. *carpet* – (fig. 13b) presenta dimensione 1,89. Si noti come ciascuna sezione mediana di quest'ultimo coincida con l'insieme di Cantor.

Allorché le operazioni di cancellazione siano condotte in maniera aleatoria, le forme che se ne ottengono possono ben rappresentare una rete di microfessure in una sezione piana. Dominio piano lacunare, ovvero curva invasiva: in entrambi i casi la dimensione frattale è intermedia tra uno e due (fig. 14).

Nel caso di sezione piana con fori, pori, fessure, crateri, etc., la parte

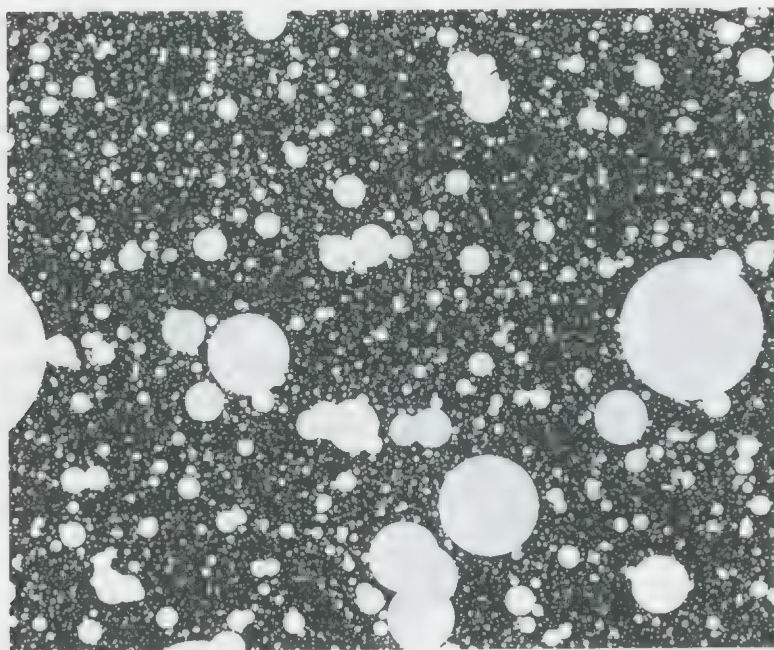


Figura 15 - Frattale lacunare con fori a tutte le scale (dimensione frattale = 1,90).

che rimane ha caratteristiche frattali lacunari, e può ben rappresentare la sezione netta resistente di un solido che si sta danneggiando ed è sul punto di cedere sotto forze di trazione. È possibile dimostrare che, nella condizione di massima forza sopportabile, la sezione danneggiata presenta dimensione 1,5 (fig. 15).

Nello spazio a tre dimensioni, infine, i frattali lacunari presentano una dimensione che è intermedia tra due e tre. La cosiddetta «spugna» – ingl. *sponge* – di Menger, la quale non è altro che una generalizzazione alle tre dimensioni della «polvere» – ingl. *dust* – di Cantor (una dimensione) e del «tappeto» – ingl. *carpet* – di Sierpinski (due dimensioni), presenta dimensione 2,73 (fig. 16). Essa è un archetipo che descrive solidi porosi o spugnosi. La densità di tali solidi non è uniforme né costante. Essa, intesa in senso classico come una massa divisa per un volume, diminuirebbe con le dimensioni del solido, poiché nel contempo aumenterebbero le dimensioni delle vacuità presenti nel solido. La densità potrebbe diventare una costante del materiale (invariante con la scala) soltanto dividendo la massa per il volume lacunare effettivamente occupato dal solido, il quale presenta una dimensione anomala minore di tre.

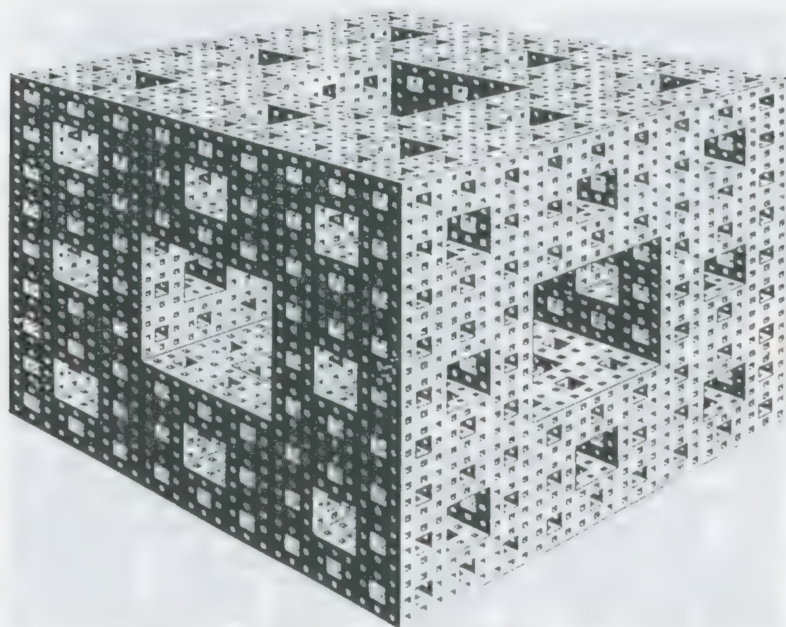


Figura 16 - Spugna di Menger (dimensione frattale = 2,73).

4. Effetti di scala sulla resistenza e sulla tenacità dei materiali

Come si è già accennato nel paragrafo introduttivo, la resistenza a trazione diminuisce all'aumentare della dimensione dei campioni. Di ciò si erano già accorti due importanti scienziati di questo secolo: l'inglese Griffith (1920) e lo svedese Weibull (1939). Griffith, studiando tale fenomeno su filamenti di vetro, fondò quella disciplina denominata «Meccanica della Frattura». Weibull, d'altro canto, fu il primo ad analizzare lo stesso fenomeno su basi statistiche. Considerando la sezione netta resistente alla massima sollecitazione come un frattale lacunare di dimensione 1,5, è possibile giustificare la diminuzione della resistenza come l'inverso della radice quadrata della dimensione del campione. Si verifica cioè una situazione del tutto analoga a quella della densità della spugna, illustrata al termine del paragrafo precedente. Come la densità, anche la resistenza diminuisce con la scala. Per ottenere una quantità uniforme e costante (invariante con la scala) è necessario dividere la forza massima sopportabile per l'area lacunare effettivamente reagente, che presenta una dimensione anomala pari a 1,5. La pseudo-resistenza che si ottiene, non è un parametro ingegneristicamente significativo, poiché la sua anomala dimensione fisica, $[F]\,[L]^{-3/2}$, è alquanto inconsueta.

Tale procedura, detta *rinormalizzazione*, ha peraltro illustri precedenti nella fisica statistica, nella teoria dei campi [10] e nella fluidodinamica turbolenta [11].

D'altra parte, in maniera per così dire speculare, si rileva sperimentalmente che l'energia di frattura aumenta all'aumentare della dimensione dei campioni. Considerando la superficie finale di frattura come un frattale invasivo di dimensione 2,5, è possibile giustificare tale aumento. L'effetto di scala questa volta è positivo, poiché, aumentando la scala, aumentano le dimensioni delle asperità attraverso cui si dissipa l'energia per rompere i legami interni del materiale.

Anche in questo ultimo caso, per ottenere una quantità uniforme e costante (invariante con la scala), è necessario dividere l'energia dissipata nel produrre la separazione per l'area della superficie invasiva di dimensione 2,5. L'energia di frattura, così rinormalizzata, presenta una dimensione fisica anomala, $[F][L]/[L]^{5/2} = [F][L]^{-3/2}$, curiosamente la medesima rispetto a quella della resistenza a trazione rinormalizzata [3].

Come è comprensibile, nei laboratori di Ingegneria Strutturale, per caratterizzare i materiali da costruzione si tende a utilizzare campioni molto piccoli rispetto alle dimensioni degli elementi in scala naturale. Ciò perturba sensibilmente le proprietà reali, fornendo resistenze sovrastimate e tenacità sottostimate. Nel caso di campioni microscopici, la resistenza può apparire persino di ordini di grandezza superiore rispetto a quella consueta, così come l'energia di frattura può apparire altrettanto inferiore rispetto a quella convenzionale.

A queste tendenze si è tentato di dare giustificazioni fenomenologiche di vario tipo, attraverso modellazioni fisiche e analitiche a volte semplicistiche. Tali giustificazioni sono risultate essere spesso contraddittorie e incomplete, o, nel migliore dei casi, non appartenenti ad un unico quadro concettuale. Si ritiene che la geometria frattale, con le procedure fisiche di rinormalizzazione, possa fornire finalmente tale cornice unificante.

Torna infatti alla mente quella frase che Mandelbrot scrive a conclusione del terzo capitolo del suo saggio [6]: «Praticamente tutti i campi di ricerca implicano una *sindrome da divergenza*. Ciò significa che una grandezza fisica, che comunemente ci si aspetta finita e positiva, risulta tendere all'infinito oppure a zero. A prima vista tale tendenza appare bizzarra e persino terrificante, ma un attento riesame ce la fa apparire spiegabile..., se si accetta di utilizzare metodi scientifici innovativi».

La profondità di queste nuove categorie scientifiche e di queste nuove congetture, sembra quasi trascendere l'ambito in cui esse sono nate, per farle approdare nell'ambito più vasto di un nuovo umanesimo, ove anche le produzioni umane di altri settori possano venire interpretate e filtrate in modo analogo.

Scrive James Gleick nel suo ben noto saggio *Chaos* [12]: «Le forme semplici non sono umane. Non sono in risonanza con il modo in cui la natura organizza se stessa, né con il modo in cui noi la percepiamo». Nei quadri di van Gogh, ad esempio, vi è sempre una quantità immensa di informazioni. Egli costruisce le sue immagini in modo complesso, iterativo, curando i dettagli a diverse scale, con pennellate nette, ma anche intricate e sovrapposte. Anche nell'architettura l'opera d'arte non ha una scala caratteristica, nel senso che contiene elementi importanti a tutte le scale. Ai grattacieli a blocchi possiamo contrapporre, ad esempio, le opere dell'estroso architetto catalano Antoni Gaudì. Un osservatore che guardi la Sagrada Familia trova sempre un particolare che ne attragga l'attenzione. La composizione muta a mano a mano che ci si avvicina e che entrano in gioco nuovi elementi della struttura.

BIBLIOGRAFIA

[1] Carpinteri A. & Ingraffea, A.R. (a cura di) (1984), *Fracture mechanics of concrete*, Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, The Netherlands.

[2] Carpinteri A. (1986), *Mechanical damage and crack growth in concrete*, Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, The Netherlands.

[3] Carpinteri A. (a cura di) (1996), *Size-Scale Effects in the Failure Mechanisms of Materials and Structures*, E & FN SPON, London, Great Britain.

[4] Popper K.R. (1970), *Logica della scoperta scientifica*, Einaudi, Torino.

[5] Thom R. (1972), *Structural stability and morphogenesis*, Benjamin, New York, U.S.A.

[6] Mandelbrot B.B. (1982), *The fractal geometry of nature*, W.H. Freeman and Company, New York, U.S.A.

[7] Enciclopedia delle Scienze Fisiche (1993), *Istituto della Enciclopedia Italiana Treccani*, Vol. II, 756-759.

[8] Caglioti G. (1994), *Simmetrie infrante*, Città Studi Edizioni, Milano.

[9] Nicolis G. & Prigogine I. (1989), *Exploring complexity*, W.H. Freeman and Company, New York, U.S.A.

[10] Wilson K. (1971), *Renormalization group and critical phenomena*, «Physical Review», Vol. B4, 3174-3205.

[11] Barenblatt G.I. (1979), *Similarity, self-similarity and intermediate asymptotics*, Consultants Bureau, New York, U.S.A.

Acc. Sc. Torino - Quaderni
7 (1998), 37-52, 8 ff.

La tecnologia di internet e le sue applicazioni

Angelo Raffaele MEO(*)

1. Principi

Nei primi anni 60 la società americana vive un momento di profondo turbamento. Il successo degli Sputnik e le prime difficoltà incontrate nel contrastare la supremazia sovietica nel settore spaziale inducono molti americani al timore di aver perduto non soltanto la supremazia scientifica e tecnologica, ma anche quella industriale, economica e militare.

Sono anni felici per gli studiosi e i ricercatori americani perché fiumi di denaro arrivano finalmente ai più ambiziosi progetti di ricerca. Insieme ad altre iniziative di ricerca e sviluppo, nasce l'Advanced Research Project Agency (ARPA), con il compito di coordinare e finanziare le ricerche scientifiche con finalità militari, e viene avviato il progetto di una gigantesca rete di trasmissione dati, finalizzata essenzialmente al coordinamento delle forze di terra, mare e aria. Nasce così ARPANET, la rete di ARPA che nel 1968 collega i più importanti supercalcolatori degli Stati Uniti.

Arpanet piace molto ai ricercatori degli Stati Uniti e del resto del mondo, che vedono in quella rete uno strumento facile e rapido per la comunicazione dei risultati del loro lavoro. Così, giocando sul fatto che i timori dei primi anni 60 si sono dissolti, gli accademici si impadroniscono dell'idea base di ARPANET, e costituiscono il primo nucleo di Internet. Ovviamente, mentre la rete desiderata dai militari era chiusa e protetta, Internet diviene sempre più libera e aperta.

La fig. 1 illustra il principio di funzionamento di Internet. Preesistevano a Internet reti di calcolatori molto diverse fra loro per tecnologia, produttore, protocolli di comunicazione. Alcune reti, ad esempio, usavano la rete telefonica e opportuni modem per collegare i vari calcola-

---

(*) Accademia delle Scienze di Torino; ordinario di Sistemi per l'Elaborazione dell'Informazione, Politecnico di Torino. Conferenza tenuta il 7 Giugno 1995.

tori. In altre reti i singoli calcolatori erano collegati fra loro da linee di collegamento «punto-a-punto» (oggi chiamate da Telecom CDN, come *circuiti diretti numerici*). Altre reti di interconnessione erano state costruite appositamente ed erano pubbliche, come le reti dati a commutazione di circuito (del tipo della rete italiana Fonia Dati promessa da Marisa Belisario, quando era presidente della ITALTEL), o le reti a commutazione di pacchetto (come l'italiana ITAPAC). I sistemi costituiti dai vari calcolatori e dalle sottoreti di comunicazione non potevano scambiarsi dati perché i protocolli di comunicazione, cioè la struttura dei pacchetti di informazione e le regole del colloquio, erano molto diverse. Inoltre ciascuno dei diversi produttori di hardware, molto geloso delle sue soluzioni tecniche, non gradiva che calcolatori di altri produttori venissero collegati alla rete.

Si decise allora di operare come indicato in fig. 1. Alla rete in alto, chiamata Rete 1 in figura, una delle reti preesistenti a Internet, si aggiunse un calcolatore che colloquiasse con gli altri calcolatori della stessa rete secondo i protocolli prestabiliti per il suo funzionamento, ma che fosse collegato a un canale di comunicazione esterno. Alla rete in basso, chiamata Rete 2 nella figura, si aggiunse un altro calcolatore, capace di scambiare dati con gli altri calcolatori della stessa Rete 2 secondo i protocolli prestabiliti per la stessa. Si collegarono poi fra di loro i due calcolatori aggiunti con un canale opportuno, generalmente una linea punto-a-punto. I due calcolatori aggiunti che facevano capo alla connessione diretta fra le due reti erano chiamati, e sono tuttora chiamati, *router* o *instradatori*. Essi non sono concettualmente o strutturalmente diversi dagli altri calcolatori; sono soltanto calcolatori specializzati nella trasmissione dati, un po' più lenti degli altri calcolatori nel fare i calcoli ma più rapidi nel ricevere o trasmettere dati sui canali di interconnessione.

Quando un calcolatore della Rete 1 vuol trasmettere un insieme di dati a un calcolatore della Rete 2, trasmette quei dati al router della Rete 1 secondo le modalità della stessa rete. Il router della Rete 1 trasmette allora quei dati al router della Rete 2 e questi convoglia i dati ricevuti al calcolatore di destinazione utilizzando le modalità di comunicazione della Rete 2. In questo modo qualunque calcolatore della Rete 1 può trasmettere dati a qualunque calcolatore della Rete 2, e viceversa.

Possiamo estendere lo schema. Ad esempio, la Rete 2 potrebbe utilizzare un secondo router per collegarsi a una terza rete chiamata Rete 3. In virtù di questo collegamento, qualunque calcolatore della Rete 1 potrebbe trasmettere dati a qualunque calcolatore della Rete 3 passando attraverso la Rete 2. Questa Rete 2 mette le proprie risorse di comunicazione a disposizione di calcolatori che appartengono a reti diverse; in cambio, altre reti, in altre circostanze, si metteranno a disposizione di

L'idea base di INTERNET

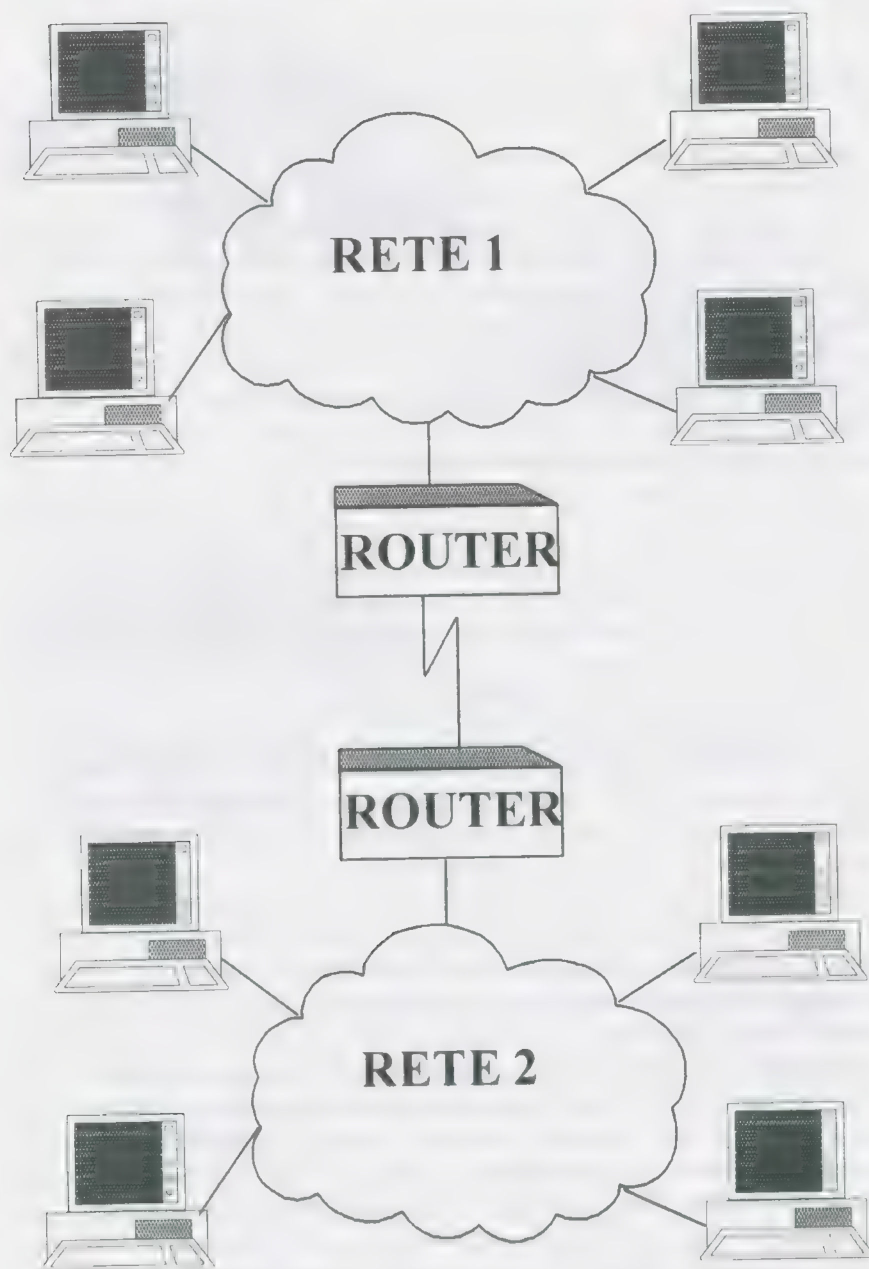


Figura 1 - Schema dei collegamenti di reti in Internet.

comunicazioni che interessano i calcolatori della Rete 2. È la collaborazione il principio fondamentale dei fornitori e degli utenti dei servizi di Internet.

2. Il lungo viaggio dei trenini dei messaggi

Nonostante il grande numero di clienti serviti — cento milioni o poco meno, nel mondo — la tecnologia di Internet è molto semplice.

Consideriamo dapprima il caso più semplice di un breve messaggio. In vacanza avete conosciuto una ragazza americana, che vi ha lasciato il suo indirizzo di posta elettronica, ed è sufficientemente carina e simpatica da meritare di essere ricordata. Così, tornando a casa, le mandate un «mail», ossia una lettera con un breve messaggio: «Un ricordo affettuoso. L'amico del mare». La vostra amica si chiama Mary e lavora nello staff segretariale di Clinton. Così il suo indirizzo di posta elettronica suona come: mary@white-house.gov.

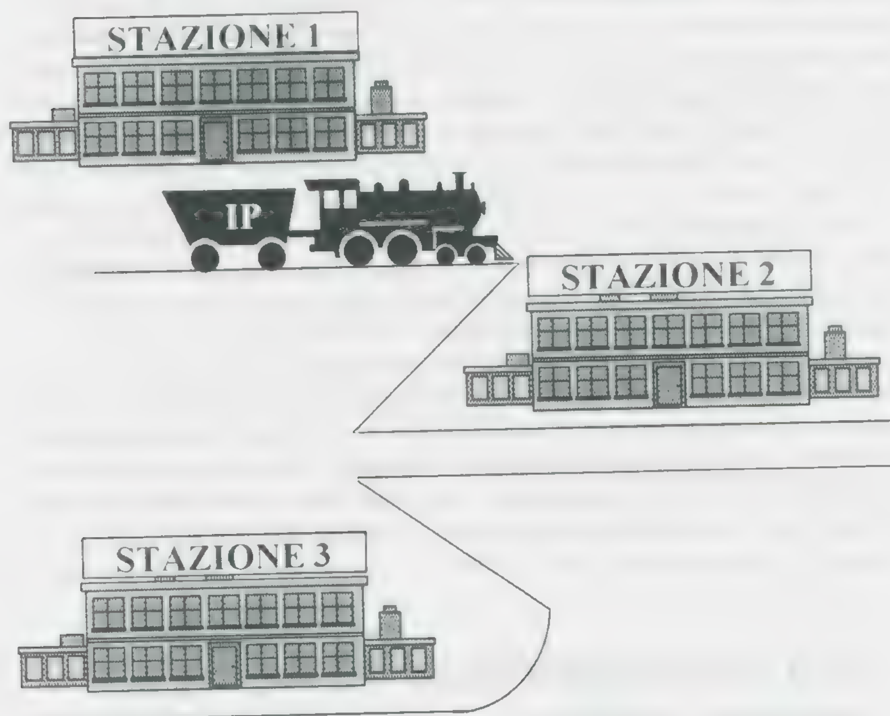
Come è ben noto i calcolatori prediligono i numeri binari, scritti quindi come sequenze di 1 o 0; quindi quell'indirizzo sarà convertito in un codice binario, più idoneo all'elaborazione automatica. La conversione da indirizzo alfabetico a numero binario non cambia la sostanza delle cose per cui supponiamo, per semplicità, che l'indirizzo non subisca alcuna modificazione.

Il vostro calcolatore raccoglie dalla tastiera il testo del messaggio e lo incolla all'indirizzo del destinatario. Se, come più spesso succede, il vostro calcolatore è collegato al calcolatore del centro che vi fornisce il servizio di collegamento a Internet («Internet provider») via modem e telefono, il messaggio arriva su quella linea a quella prima stazione di transito.

Tutto avviene come in una grande rete ferroviaria (fig. 2). Il capostazione della stazione di partenza, ossia il vostro calcolatore, invia un trenino con un unico vagoncino contenente un carico di bit, il vostro messaggio. Sulla locomotiva c'è un piccolo carico di servizio, l'indirizzo di destinazione.

Quel trenino è chiamato IP, dalle iniziali di «Internet Protocol», una denominazione che in realtà non ha un ricco significato. Il trenino IP arriva alla sua prima stazione intermedia, ossia al calcolatore del vostro Internet Provider. Il capostazione si affaccia nella locomotiva e legge l'indirizzo destinazione. L'ultima parte dell'indirizzo (.gov) indica la rete degli enti governativi degli Stati Uniti, per cui il messaggio dovrà essere inoltrato in America. Il capostazione consulta allora una grande tabella, che gli indica, per ogni destinazione finale, la destinazione suc-

è come una grande rete ferroviaria...



i router sono capistazione molto intelligenti

Figura 2 - Trasmissione dei messaggi: numero limitato di bit.

cessiva a cui inviare il trenino. Così il trenino viene inviato a Milano, presso un istituto di ricerca dell'università, da cui devono transitare tutti i trenini partiti da Torino con destinazione negli Stati Uniti. Il capostazione di Milano farà lo stesso lavoro, e inoltrerà il trenino a Bologna, e così, di stazione in stazione, sino all'arrivo nella stazione finale, il calcolatore dove risiede la casella postale di Mary.

Un vagoncino IP ha una capacità limitata, pari a circa 1500 caratteri. Di conseguenza, il breve messaggio per Mary può essere contenuto in un unico vagoncino, ma il milione di bit necessari per rappresentare un'immagine con ottima risoluzione non sta in un vagoncino, ma richiede un treno composto da moltissimi vagoncini. Sfortunatamente, la

rete ferroviaria di Internet non è ancora predisposta per convogliare treni con più di un vagoncino; per questa ragione il capostazione di partenza, ossia il vostro calcolatore, dovendo trasmettere un treno di cento vagoncini, come sua prima operazione scompone il treno in cento trenini, con cento locomotive diverse, ciascuna delle quali trascina un diverso vagoncino. Il lungo treno di partenza è chiamato TCP, come «transport control protocol», una sigla misteriosa che ancora una volta non ha un profondo significato (fig. 3).

I cento trenini IP in cui il capostazione ha scomposto il lungo treno TCP sono autonomi e viaggiano ciascuno per proprio conto. Spetta al capostazione della destinazione finale, il calcolatore che ospita la posta di Mary, raccogliere i singoli vagoncini e incollarli nell'ordine corretto, ricostruendo il lungo treno di partenza.

Questo meccanismo costituisce il principale difetto di Internet, probabilmente l'unico serio. I vari trenini IP che portano il carico del lungo treno TCP, non partono insieme, e arrivano in ordine sparso. Inoltre, se uno solo dei trenini elementari si perde, il capostazione di arrivo non è più in grado di ricostruire il treno. In questo caso; deve mandare un trenino al capostazione di partenza, avvisandolo del problema e invitandolo a ritrasmettere tutto il carico.

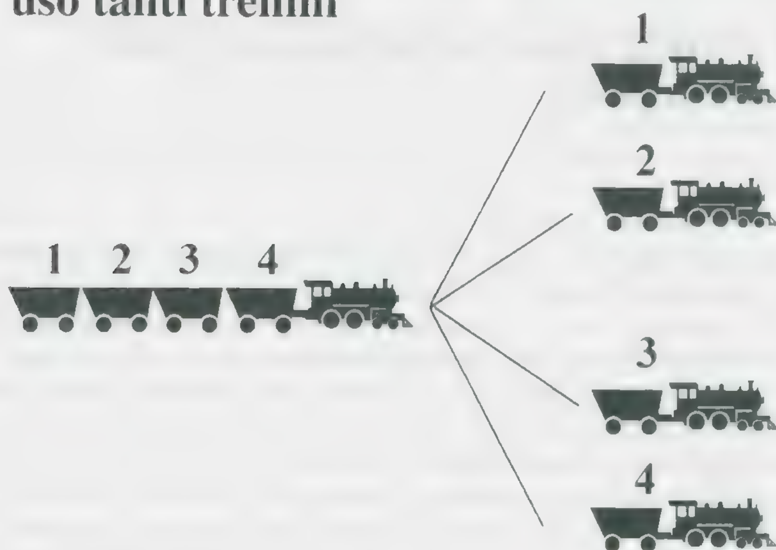
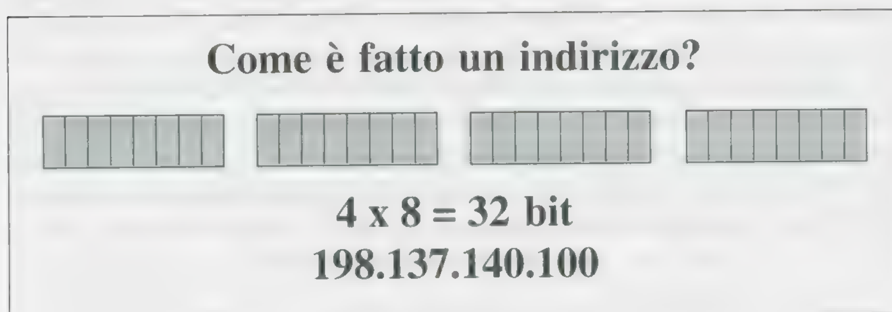


Figura 3 - Trasmissione dei messaggi: numero più alto di bit.

L'arrivo in ordine sparso non pone alcun problema alla trasmissione di messaggi scritti, ma costituisce un ostacolo difficilissimo alla trasmissione di voce. In questo caso, infatti, tutti i segmenti elementari del segnale vocale devono arrivare entro un decimo di secondo ed essere riprodotti nell'autoparlante del calcolatore destinazione nell'ordine corretto, senza discontinuità, pena la perdita dell'intelleggibilità del messaggio. Per questo la trasmissione della voce su Internet costituisce oggi uno dei temi più interessanti della ricerca tecnologica.

3. Indirizzi

Abbiamo accennato al fatto che l'utente di Internet usa indirizzi simbolici e mnemonici, come mary@white-house.it, ma che i calcolatori della rete interpretano le destinazioni dei messaggi solo se queste sono scritte in codice binario, come sequenze di 1 o 0. Spetta a un modulo software specializzato, chiamato «Domain Name Server», e allocato di norma nel calcolatore «server» degli accessi alla rete, il compito di tradurre gli indirizzi simbolici negli indirizzi fisici scritti in binario (figg. 4 e 4 bis).



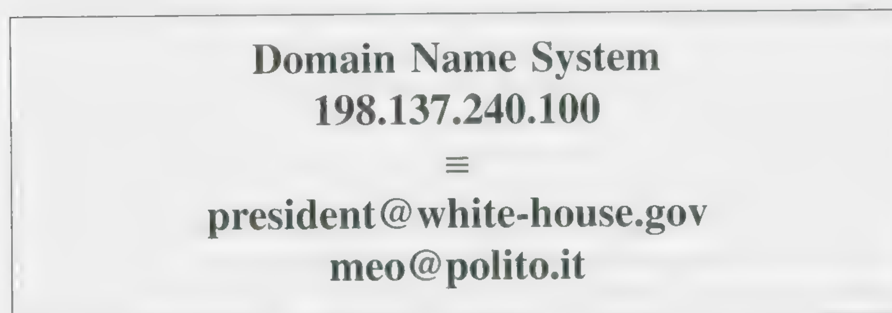


Figure 4 e 4 bis - Come è costruito un indirizzo Internet e come viene tradotto.

Un indirizzo fisico è composto da quattro numeri binari, ciascuno dei quali è costituito da 8 bit, per un totale di 32 bit. Con 32 bit si possono distinguere 2^{32}, oltre 4 miliardi di indirizzi diversi, che, nel momento in cui i comitati internazionali definirono le modalità di indirizzamento, sembravano ampiamente sufficienti a coprire tutte le esigenze per molti anni. A distanza di pochi anni, gli indirizzi cominciano a scarseggiare, anche perché le grandi organizzazioni prenotano per future esigenze campi di indirizzi molto estesi. I comitati internazionali stanno già lavorando sulla definizione di un nuovo standard che consentirà la specificazione di migliaia di indirizzi diversi per ciascun metro quadro della superficie della terra. Questa cifra può sembrare pazzesca se pensiamo che gli utenti della rete siano gli uomini; nella realtà, i soggetti interessati alle comunicazioni su Internet sono i calcolatori che diventano ogni giorno più piccoli e numerosi. Anche il vostro tostapane avrà il suo indirizzo.

4. Le applicazioni

Il software per la comunicazione è organizzato a strati sovrapposti. Al livello più basso sono i programmi per iniettare i bit sui modem e quindi sui doppini del telefono, oppure sui circuiti diretti numerici o su altri canali di comunicazione. Al livello intermedio sono i programmi che attuano il protocollo TCP/IP, ossia l'invio dei treni di dati come pluralità di trenini elementari. Finalmente, al livello più alto, figurano vari programmi applicativi del mondo Internet, ossia i programmi che si interfacciano direttamente con l'utente e rendono disponibili le varie funzionalità o «applicazioni» della rete. Poiché il loro numero è molto grande, ci si limita qui a ricordare i più importanti.

La posta elettronica

L'utente che desideri utilizzare la posta elettronica di Internet deve possedere almeno una casella elettronica o «mail box» su un calcolatore della rete che rimanga sempre acceso e collegato alla rete stessa. Nel caso più frequente, questo calcolatore è il «server» dell'Internet provider. Una casella elettronica è fisicamente costituita da una porzione della memoria di massa, generalmente dello «hard disk», sul calcolatore che ospita la casella elettronica dell'utente. Questa casella elettronica può essere immaginata come una tabella, ove ogni riga corrisponde a un diverso messaggio.

A sua volta una riga della casella è suddivisa in più campi, i più importanti dei quali sono il nome del mittente, il suo indirizzo e il contenuto del messaggio vero e proprio. Quando un utente vuol leggere la posta ricevuta, si collega, da qualunque calcolatore in rete e in qualunque ora del giorno, al calcolatore che ospita la sua casella elettronica e porta, nella propria memoria prima e sullo schermo poi, tutta la successione dei messaggi ricevuti.

Il trasferimento di file

Il trasferimento di file, o «file transfer»(FTP per gli intimi), può essere visto come un'estensione della posta elettronica). È idoneo al trasferimento senza errori di documenti molto lunghi, come progetti, filmati, articoli scientifici o interi volumi. Costituisce ormai il meccanismo standard per la diffusione della documentazione nell'ambito della comunità scientifica mondiale.

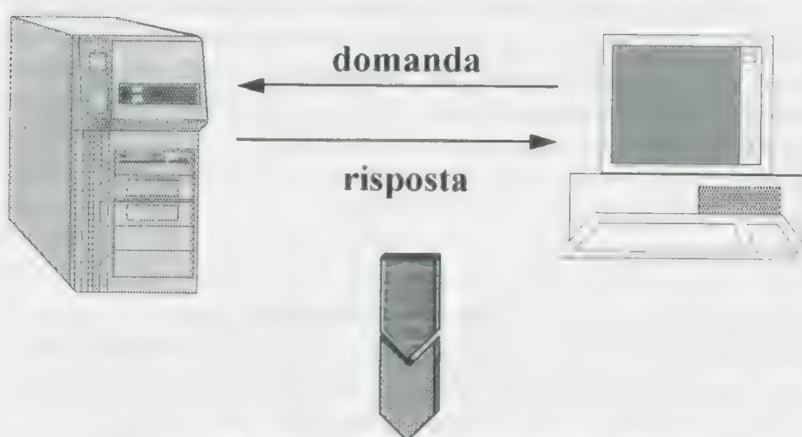
L'accesso a un calcolatore remoto

Un opportuno servizio di Internet, chiamato «Telnet», offre all'utente la possibilità di collegarsi a un calcolatore remoto, allocato forse a molte migliaia di chilometri di distanza, e di ordinargli l'esecuzione di un programma. Dal punto di vista dell'utente, tutto avviene come se egli fosse collegato alla consolle del calcolatore remoto; nella realtà tale servizio è ottenuto attraverso lo scambio di una successione di messaggi sulla rete dell'utente e il calcolatore remoto.

Qualche volta, Telnet rende disponibili in tutto il mondo risorse di calcolo preziose; qualche altra volta il collegamento rende possibile il movimento di una telecamera e l'acquisizione delle immagini catturate o più banalmente l'accesso al calcolatore che gestisce le vendite di un grande emporio.

Il Gopher

Centinaia di migliaia di calcolatori in tutto il mondo mettono a disposizione di tutti enormi volumi di informazione. Molti programmi sono stati sviluppati per rendere più facile e proficua la «navigazione» nel grande mare di questi «data base server», o fornitori di archivi. Tra



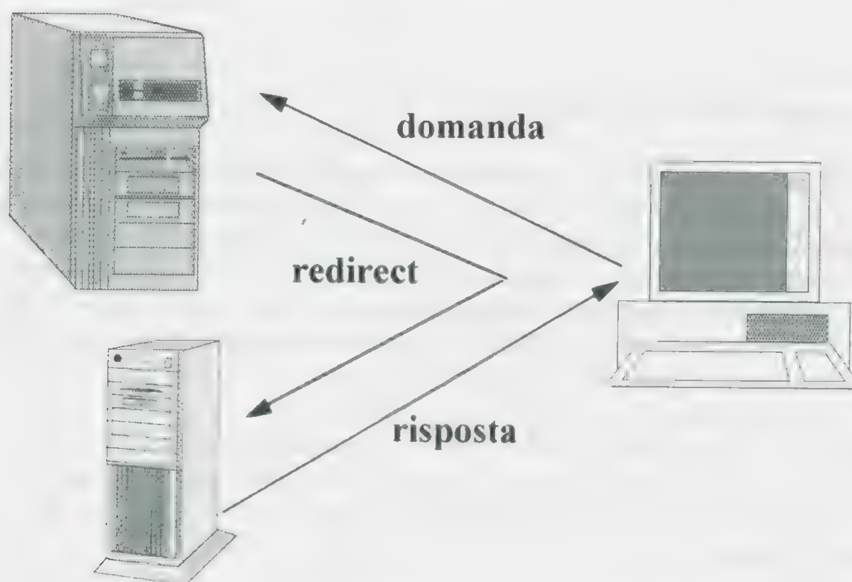


Figura 5 - Le due possibilità del sistema informativo.

i più importanti merita di essere ricordato, per ragioni storiche, il «Gopher», il primo dei programmi con ridirezione automatica delle interrogazioni.

Prima del Gopher, quando un utente voleva acquisire informazione

da un archivio, doveva conoscere ed esplicitare l'indirizzo del calcolatore che ospitava quell'archivio; con il Ghoper è sufficiente conoscere l'indirizzo del calcolatore a cui rivolgere la prima interrogazione. Prima del Gopher le interrogazioni erano dirette: l'utente forniva una richiesta al calcolatore di dato indirizzo e questo rispondeva con i dati richiesti (fig. 5 sezione superiore).

Con il Gopher, l'utente formula una prima richiesta a un calcolatore di indirizzo noto e questo risponde con dati e con l'indicazione di uno o più indirizzi di altrettanti archivi contenenti informazione significativa. Se l'utente lo desidera, una nuova richiesta di informazione sarà inviata a un altro calcolatore in modo automatico, senza esplicita formulazione del suo indirizzo (fig. 5, sezione inferiore).

Il Gopher è un roditore che scava gallerie «internazionali», per es. nel sottosuolo della zona di confine fra gli Stati Uniti e il Canada. La sua internazionalità e la sua vocazione a una continua attività in tutte le direzioni giustificano il nome dato al primo prodotto per interrogazioni con ridirezione.

Il World Wide Web

Figlio del Gopher in quanto fa propria l'idea della ridirezione automatica delle interrogazioni, il WORLD WIDE WEB, o più familiarmente, w.w.w., ossia «la ragnatela che avvolge il mondo», è lo standard, proposto da alcuni ricercatori del C.E.R.N. di Ginevra nel 1992, per la «navigazione» su Internet. Oggi a quello standard si ispirano quasi tutti i prodotti commerciali per il cosiddetto «netsurfing».

Una pagina «www» contiene generalmente un certo numero di parole sottolineate o icone o altri segni che fanno esplicito riferimento ad altri concetti o ad altri dati. Ciascuno di quei riferimenti nasconde l'indirizzo dell'archivio dove i nuovi dati potranno essere trovati; pertanto per l'utente sarà sufficiente spostare il cursore su quella parola o su quella icona e premere il pulsante del mouse, per ottenere l'accesso automatico all'indirizzo del nuovo «sito» a cui rivolgere l'interrogazione.

A differenza del Gopher il www tratta, come suoi componenti fondamentali, non soltanto i testi e i numeri, ma anche le immagini, i suoni, i filmati. Inoltre il meccanismo è molto potente e flessibile, per cui l'interrogazione può essere facilmente integrata con altre funzionalità della rete, in modo da attuare un'ampia gamma di applicazioni (fig. 6).



Figura 6 - Le aree applicative del web.

Motori di ricerca

Talvolta non è noto a priori l'indirizzo del sito da dove iniziare la ricerca dei dati a cui si è interessati. Per risolvere questo problema sono stati attivati opportuni programmi che «sfogliano» tutta la documentazione disponibile in centinaia di migliaia di «data base server», ossia «serventi di archivi» della rete.

Questi calcolatori e i programmi relativi sono chiamati «motori di ricerca» perché a tempo pieno interrogano tutti i data base server della rete, sintetizzando poi i risultati del proprio lavoro in enormi indici. Quando un utente desidera raccogliere informazioni su un determinato argomento, si collega a uno dei siti ove è allocato il grande indice, ed esprime la propria richiesta utilizzando una o più parole chiave. Ad esempio, se fosse interessato ad acquistare un windsurf nuovo, egli si collegherebbe al motore di ricerca, esplicitando la parola «windsurf» nell'apposita finestrella destinata alle parole chiave. Il motore di ricerca proporrebbe allora una sequenza di siti e documenti, contenenti informazioni sui windsurf.

Nel momento in cui scriviamo i motori di ricerca più noti sono «Yahoo» e «Altavista».

Newsgroup, chat e phone

Le «newsgroup» sono grandi «tazebao» elettronici ove i membri di una comunità di utenti che condividono l'interesse per un determinato problema, o «gruppo di interesse», espongono liberamente le proprie opinioni. Nel corso delle ultime elezioni politiche molti italiani residenti all'estero hanno condiviso sulle «News» con i residenti in Italia la passione per il dibattito politico.

Le «chat» sono conversazioni in tempo reale fra gli utenti della rete. Un calcolatore ospita la conversazione; a quel calcolatore e dallo stesso sono trasmessi i messaggi di tutti gli iscritti alla conversazione. Eventualmente il dibattito può essere disciplinato da un utente «chairman» o presidente, che controlla la validità dei messaggi ricevuti prima di irradiarli agli altri partecipanti alla discussione. Attualmente le chat sono soltanto testuali, per cui i messaggi sono costituiti esclusivamente da sequenze di caratteri, ma presto diverranno multimediali, con messaggi parlati e la televisione dei volti dei partecipanti al dibattito.

Il «phone» o «talk» è la particolarizzazione del «chat» a due soli utenti, con l'obiettivo di rendere il colloquio particolarmente rapido. Per ora la comunicazione è testuale, ma presto sarà anche acustica e visiva[1].

---

[1] In questa conferenza, tenuta a Torino nel Giugno 1995, dissi, a proposito di «chat» e «phone», esattamente quanto qui riportato, ossia che la comunicazione per il momento era limitata alle sequenze di caratteri, ma che presto avrebbe contenuto anche i messaggi vocali e le immagini in movimento come nelle teleconferenze su canali a larga banda. E ricordai, per essere più convincente, due episodi contrastanti che risalivano ai primi anni della vita del telefono. Si discuteva allora sul futuro del nuovo strumento di comunicazione e il dibattito vedeva contrapposti pessimisti e ottimisti. Fra i primi era il ministro delle poste di Sua Maestà

5. Il futuro di Internet

Abbiamo accennato a uno dei difetti della rete: la consegna dei pacchetti di informazione in ordine sparso, senza alcuna garanzia che entro un intervallo di tempo predefinito tutti i frammenti del messaggio arrivino a destinazione. Questo difetto è intrinsecamente legato a un secondo difetto, che ha un'importanza ancora superiore: la larghezza di banda dei canali su cui viaggia l'informazione di Internet, ossia il numero di bit al secondo che sono assegnati di norma a un utente è piccolo in rapporto a esigenze come la trasmissione della voce o dei filmati in tempo reale.

Il sogno è la «TV on demand», ossia la possibilità di collegarsi a un «video server» remoto per ricevere in tempo reale il filmato dell'ultima udienza del Papa, o la finale del torneo di tennis femminile di Wimbledon del 1970, o uno spettacolino non raccomandabile ai bambini (nella speranza che questi ignorino l'indirizzo del sito relativo).

Un terzo difetto è rappresentato dalla limitata sicurezza attuale della rete. La cronaca ha già registrato un divorzio per colpa della sposa documentata dal marito hacker con una intrusione nella rete.

Inoltre, come superare il limite evidenziato nella vignetta di un noto settimanale americano (fig. 7) (dove tra l'altro si testimonia la gloria internazionale del mio cane Moon e della sua ITALCUCCE, per le quali rimando alla precedente conferenza per I mercoledì dell'Accademia)?

Sono profondamente convinto che i molti santi che popolano il paradiso della scienza e della tecnologia di oggi faranno entro pochissimi anni i miracoli necessari per superare gli attuali limiti di Internet.

In primo luogo, il «santo ragnetto del silicio», ossia il microprocessore, avendo raggiunto velocità dell'ordine di 100 milioni di istruzioni al secondo, riuscirà ad attuare algoritmi efficientissimi per la riduzione dei volumi di informazione di un messaggio vocale, un'immagine, un filmato.

Inoltre, la «santa fibra del vetro opaco», ossia la fibra ottica, promette di raggiungere entro un paio di anni velocità di trasmissione dell'ordine delle centinaia di miliardi di bit al secondo, milioni di volte la capacità del doppino telefonico, come mostrato dall'esperimento dei la-

---

il Re di Gran Bretagna che osservava che i postini avevano in più, rispetto ai telefoni, la capacità di ricercare i destinatari dei messaggi. Tra i secondi era il sindaco di Boston che inaugurando la prima linea telefonica fra New York e la sua città enfaticamente proclamava: «... e verrà il giorno in cui ogni città degli Stati Uniti avrà il suo telefono». Nella mia conferenza ricordai questi due episodi per rendere convincente l'ipotesi che nell'arco di pochi anni «chat» e «phone» sarebbero stati multimediali. Nel momento in cui il testo della conferenza viene redatto, a pochi mesi di distanza, alcuni prodotti commerciali per parlarsi e vedersi via Internet sono già disponibili negli scaffali dei negozi di prodotti informatici.



Figura 7 - Uno dei limiti di Internet.

boratori della Nippon Telecom (fig. 8) ove una fibra lunga un milione di chilometri ha operato senza amplificazioni intermedie alla velocità di 10 miliardi di bit per secondo.

Con le nuove fibre ottiche la banda disponibile per ogni utente della rete sarà praticamente illimitata.

Per quanto concerne i problemi della sicurezza, la soluzione verrà dalla matematica. La crittografia risolverà i problemi delle mogli infedeli, e le tecniche della firma elettronica, certamente più sicura della firma su carta, consentiranno di verificare se si sta colloquiando con un cane o con il presidente degli Stati Uniti. Anche il commercio elettronico diverrà una realtà importante per milioni di uomini.

Una conferenza su Internet dovrebbe concludersi con un'analisi dello scenario delle applicazioni future. Ma questo apparrebbe così complesso da richiedere molte ore di riflessione. Per questo preferisco concludere indicando in tre grandi aree applicative — telelavoro, telemedicina, teledidattica — e di collegarmi alla già citata conferenza precedente presso l'Accademia, per riflettere sulle conclusioni di quel giorno e sui progressi dell'informatica nell'arco di un paio di anni.

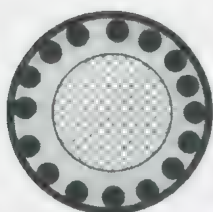




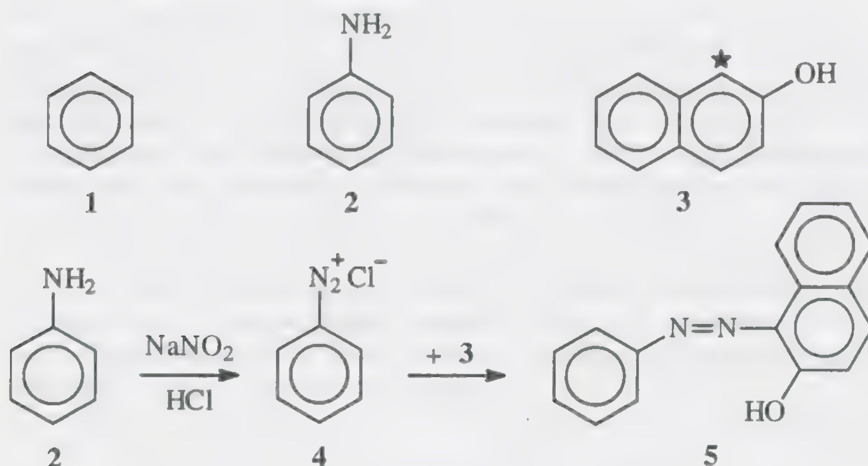
Figura 8 - Velocità raggiunta dalle trasmissioni in fibre ottiche.

Acc. Sc. Torino - Quaderni
7 (1998), 53-63, 5 ff.

Un Mondo colorato visto dal chimico

Ermanno BARNI (*)

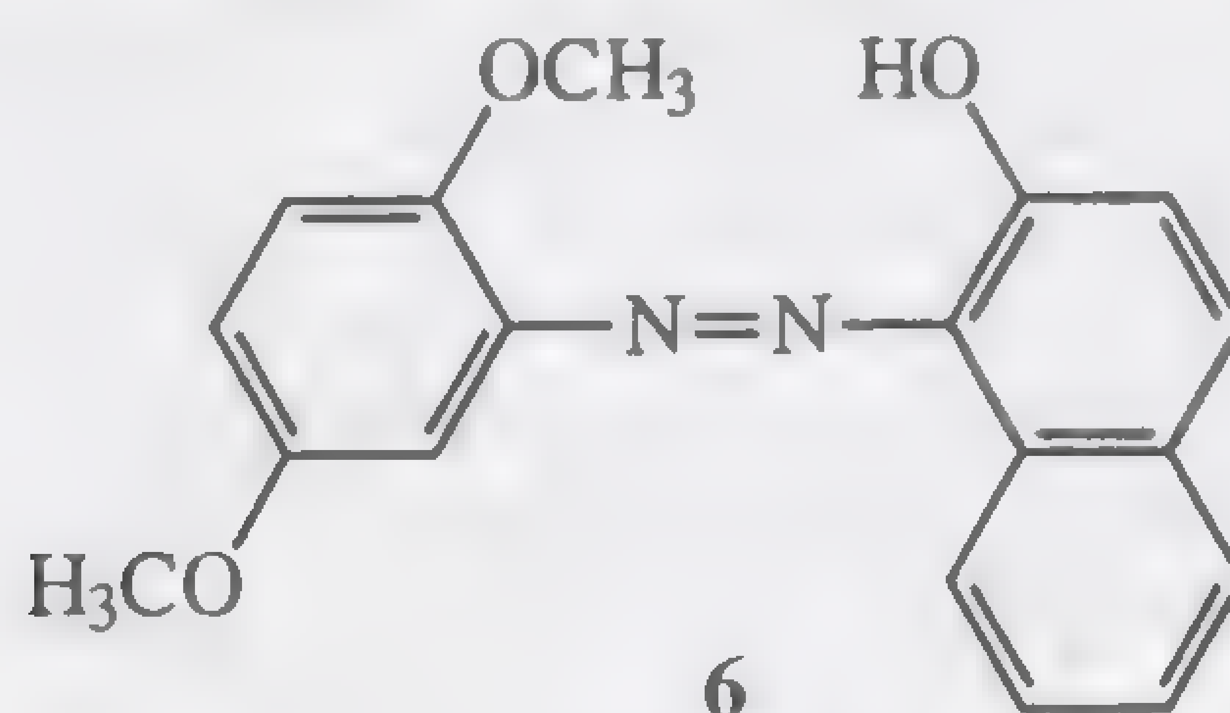
Un mondo colorato è sicuramente cosa attraente ma, se ci si mette di mezzo il chimico, il pensiero corre subito ai coloranti di sintesi, alle ammine aromatiche ed alle relative proprietà carcinogene. Questo, nell'opinione pubblica. Non meno teneri sono anche quei chimici, e sono la grande maggioranza, che non si occupano specificamente di coloranti. Per loro, i coloranti sono il risultato della diazotazione di una ammina aromatica con nitrito di sodio e acido cloridrico, seguita dalla copulazione con un naftolo.



Schema 1

(*) Accademia delle Scienze di Torino; ordinario di Chimica Organica, Università di Torino. Conferenza tenuta il 23 Marzo 1998.

Nello *Schema 1* sono riportate le formule del benzene **1**, il capostipite degli idrocarburi aromatici, dell'anilina **2**, la capostipite delle ammine aromatiche, del beta-naftolo **3**, il copulante più diffuso. Sia ben chiaro che il termine «aromatico» ha un significato prettamente chimico e totalmente disgiunto da quello del linguaggio comune: benzene ed anilina hanno odore non certo gradevole. Trattando l'anilina in ambiente acido per acido cloridrico con nitrito di sodio, si forma in situ l'acido nitroso, che trasforma l'anilina nel suo sale di diazonio **4** il quale, con beta-naftolo in ambiente basico, reagisce con formazione del colorante **5**.



Nella conferenza dal vivo, è stata eseguita la preparazione del colorante **6** nella versione di AZOCOLORANTE e di COLORANTE AZOICO. Il primo è stato ottenuto sotto forma di precipitato di colore rosso carminio in un becker da laboratorio, il secondo è stato ottenuto a sviluppo su fibra, impregnando una pezza di cotone con la soluzione del copulante **3** e passandola successivamente nel bagno dell'opportuno sale di diazonio. Si noti che la struttura del colorante **6** è la stessa per ciascuna delle due varianti preparative.

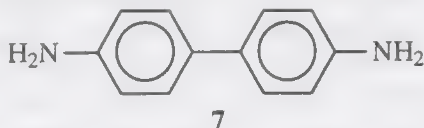
Può essere interessante fare qualche considerazione in materia di sicurezza, cogliendo lo spunto dall'esperimento eseguito in sala. In prima battuta, lo spettatore potrebbe pensare di aver corso qualche rischio, essendo stati manipolati una ammina aromatica ed un azocolorante (entrambi potenziali carcinogeni).

$$\text{SICUREZZA} = \text{MINIMIZZAZIONE DEL RISCHIO}$$

$$\text{RISCHIO} = \frac{\text{PERICOLO} \times \text{ESPOSIZIONE} \times \text{TEMPO} \times \text{MAGNITUDO} \times \text{DISTRAZIONE}}{\text{FORMAZIONE} - \text{INFORMAZIONE} \times \text{DISPOSITIVI} \times \text{ATTENZIONE}}$$

Premesso che la sicurezza è la minimizzazione del rischio, si vede che il rischio è una frazione che porta a numeratore i fattori che lo aumentano, cioè il pericolo intrinseco della sostanza, l'esposizione (la distanza fisica dalla fonte di pericolo), il tempo in cui si convive con il pericolo, la magnitudo (la quantità di sostanza), la distrazione. A deno-

minatore ci sono i fattori che diminuiscono il rischio, cioè la formazione-informazione, i dispositivi di protezione e l'attenzione. Nel caso in esame, l'operatore presenta un denominatore molto grande perché è ben formato ed informato, attento e protetto, ed un numeratore molto piccolo, grazie ad un tempo di esposizione di pochi minuti, all'assenza di distrazione, all'impiego di quantità esigue di sostanza. Il pericolo intrinseco della sostanza sarebbe stato molto elevato, se si fosse usata la benzidina **7**, ammina da tempo bandita dall'industria coloristica per le sue conclamate capacità di provocare il cancro alla vescica.



7

L'azocolorante **6** è il CITRUS RED No. 2, che è classificato nell'Handbook dei coloranti per alimenti, farmaci, cosmetici e dispositivi medici, tra quelli permessi. Quindi, un primo avvertimento a non fare di ogni erba un fascio. Si è usata una ammina aromatica, si è fatto un azocolorante che però può stare tranquillamente, sotto forma di rossetto, sulle labbra delle gentili signore. Questa affermazione può essere ben documentata. Oggi tutti conoscono il termine «certificazione» a seguito delle norme ISO 9000 sulla qualità (cui si collegano le più recenti ISO 14000 sull'ambiente e BS 8800 sulla sicurezza). Ebbene, i coloranti FD&C (Food, Drugs & Cosmetics) sono antesignani della certificazione: la prima certificazione è del 1° Aprile 1908. Il Citrus Red n.° 2 **6** non è soltanto un «permitted colorant» ma è anche un «certified color».

Con un titolo che contiene i termini «colorato e visto» diventa atto dovuto parlare rispettivamente di colore e di occhio. Nel titolo c'è anche il «chimico», cui è stato dato spazio con la preparazione del colorante **6** e cui verrà lasciata la parte finale.

Che cosa è il colore? La definizione ufficiale da fonte autorevole (Colour Terms and Definitions, Society of Dyers and Colourists, 1988) sia che la si legga in inglese, che in italiano, lascia una sensazione sgradevole.

DEFINIZIONE DI COLORE

COLOUR

That characteristic of the visual sensation which enables to distinguish differences in its quality, such as may be caused by differences in the spectral distribution of the light rather than by differences in spatial distribution or fluctuation with time.

COLORE

Quella caratteristica della sensazione visiva che rende capaci di distinguere differenze nella sua qualità, quali possono essere causate da differenze nella distribuzione spettrale della luce piuttosto che da differenze nella distribuzione spaziale o da fluttuazioni nel tempo.

Molto meglio essere un po' più sempliciotti e dire che IL COLORE È IL COLORE, così come L'ACQUA È L'ACQUA e la BELLEZZA È LA BELLEZZA.

La luce è quell'insieme di radiazioni elettromagnetiche che vanno dai raggi cosmici alle onde herziane, si propagano nel vuoto alla velocità di circa 300.000 km al secondo, posseggono un'energia decrescente al crescere della lunghezza d'onda. Il tutto è governato da equazioni tanto semplici, quanto fondamentali. Facendo uno zoom nello spettro elettromagnetico nella porzione di lunghezze d'onda fra 400 e 700 nm (il nanometro equivale a 10^{-9} metri), si individua la luce che è visibile dall'occhio umano in forma colorata. Schematicamente individuiamo tre bande fondamentali, i cui fotoni hanno energia decrescente nel verso blu-verde-rosso.

L'occhio è un organo meraviglioso, che non ci ha ancora svelato completamente l'intimo meccanismo della visione. La retina contiene due tipi fondamentali di fotoricettori: i bastoncelli, cui è demandata la visione notturna che è acromatica e mal definita (la gallina non li possiede e pertanto si corica all'ora delle galline), ed i coni cui è demandata la visione diurna che è cromatica e ben definita (il gufo non li possiede e pertanto di giorno se ne sta rintanato e di notte, poveretto, vede grigio e confuso). L'uomo, per sua fortuna, li possiede entrambi, deve però fare attenzione alle fasi crepuscolari, nelle quali avviene il trapasso di consegne coni-bastoncelli o viceversa. Si è detto che l'occhio è meraviglioso, e come tale gli si perdona un certo numero di difetti. Tra questi se ne esaminano due: l'incapacità di discernere se una luce sia monocromatica o policromatica, e l'incapacità di memorizzare il colore. Mentre lo spettrofotometro, nel suo tracciato, differenzia nettamente le due radiazioni colorate della fig. 1, l'occhio vede giallo in entrambi i casi. Nella parte **A** della fig. 2 si nota come, proiettando tre fasci di luci primarie (blu, verde, rossa) su uno schermo bianco si ottenga il bianco dalla loro miscela additiva, il cyan dalla miscela binaria blu+verde, il magenta (blu+rosso), il giallo (verde+rosso). Se, ad esempio, ci si avvicina ad uno schermo televisivo, che funziona sul principio delle miscele additive con la solita complicità dei difetti dell'occhio, si nota che un oggetto, che a distanza ottimale appare giallo, è in realtà la risultanza di una rapida sequenza alternata di impulsi verdi e rossi.

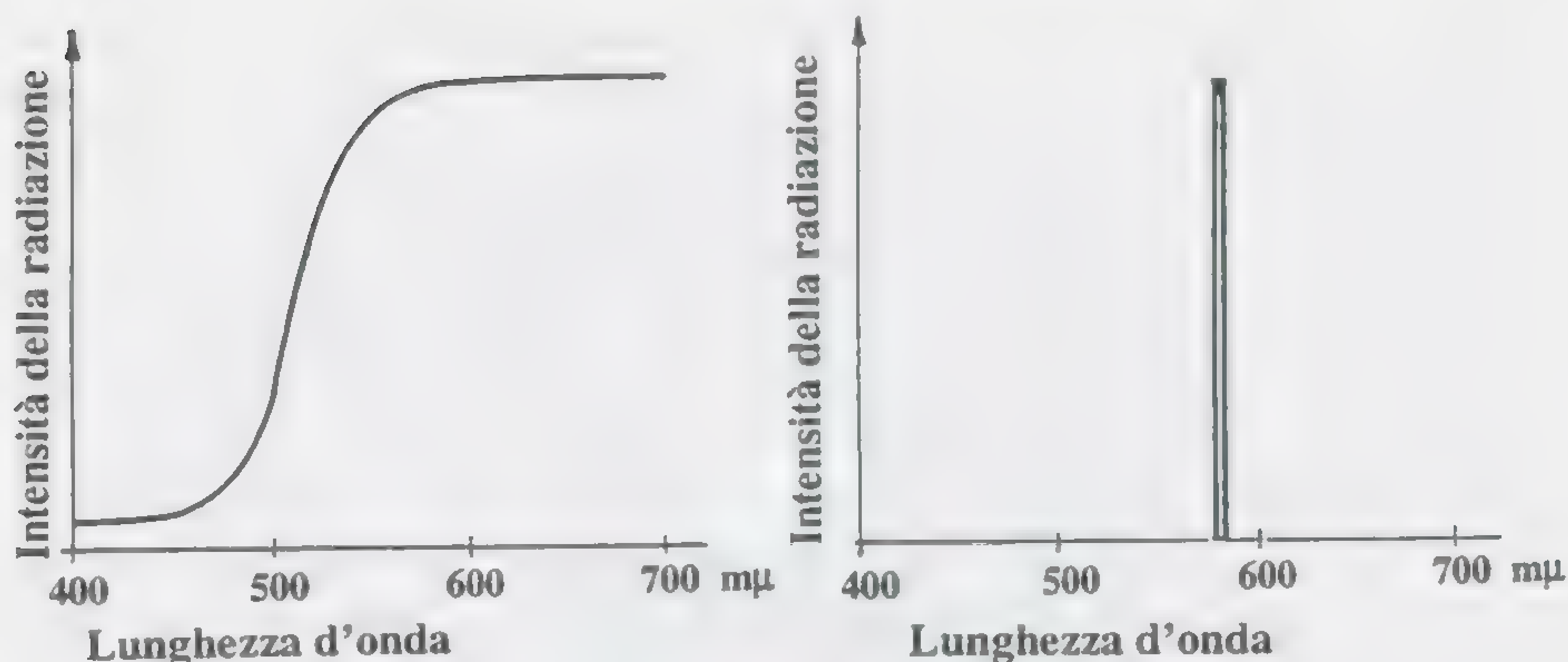


Figura 1 - Distribuzione spettrale della radiazione per la luce gialla.

La stragrande maggioranza degli oggetti che vediamo colorati non è fatta di luci che si sommano, bensì, trae il colore dalla interazione sottrattiva di lunghezze d'onda selezionate da parte dell'oggetto nei confronti di una luce che lo illumina. Nasce così la terna dei sottrattivi primari (parte **B** della fig. 2), giallo, magenta e cyan che, tutti e tre insieme sottraggono tutta la luce bianca dando il nero e, lavorando a coppie, danno rispettivamente il blu, il verde ed il rosso (vedi caso i primari additivi). È il caso della fotografia a colori dove, giocando su una bilanciata sottrazione di colori in strati sovrapposti di emulsione fotosensibile, si riproduce, come stampa a colori, o come diapositiva, il mondo colorato che osserviamo.

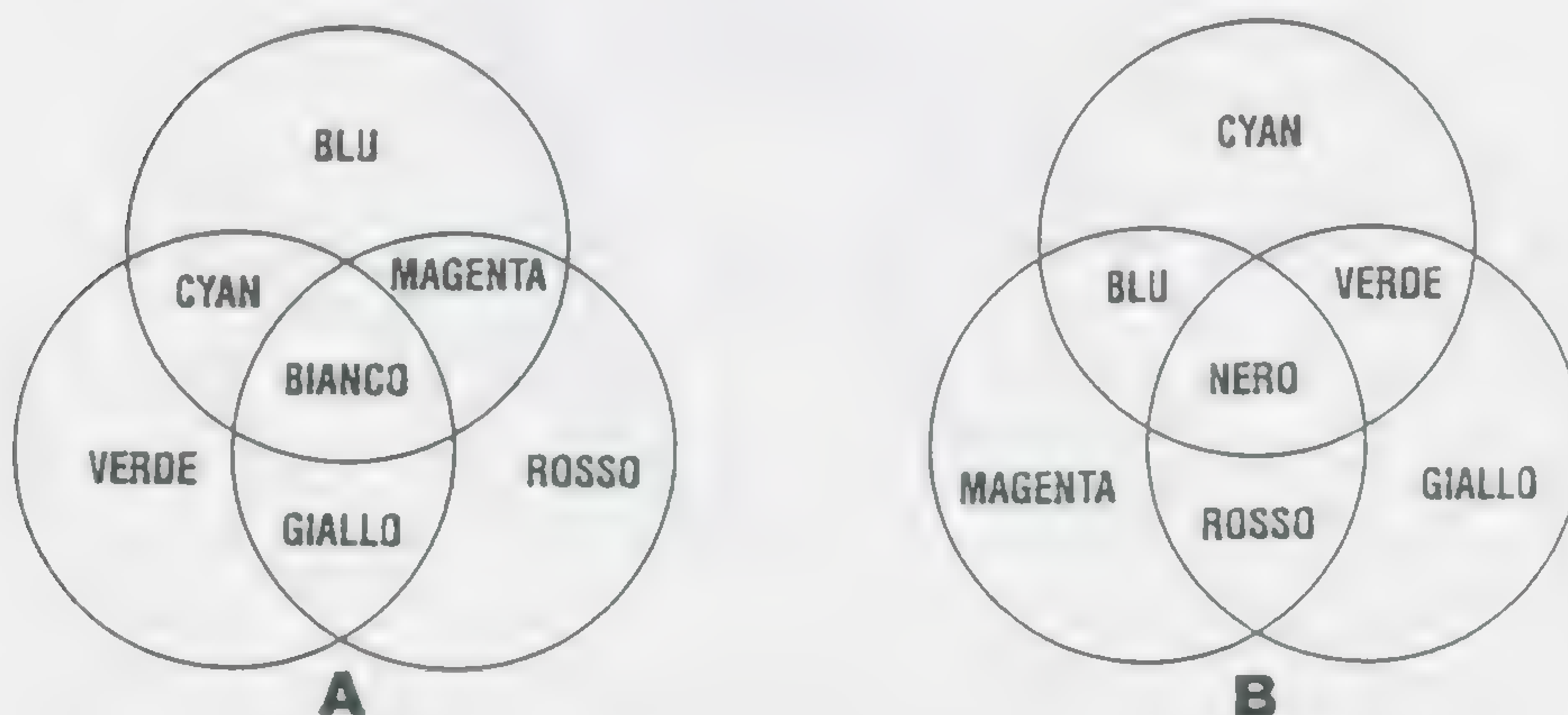


Figura 2 - Miscele di colori: A miscele additive, B miscele sottrattive.

Non si è dimenticato il secondo difetto dell'occhio: la mancanza di memoria per il colore. Premesso che l'occhio ha una notevole capacità di differenziare i colori quando li osserva in simultanea, nel giro di pochi secondi non è più capace di individuare i campioni, se li osserva ad uno ad uno. Le conseguenze sono notevoli e possono avere implicazioni economiche e forensi rilevanti: si pensi ad un tintore che ha riprodotto il colore del campione che gli è stato commissionato (si parla di tonnellate di merce) e che, secondo il cliente (che è magari a distanza di centinaia di chilometri), non ha dato un'imitazione perfetta. Nasce cioè il problema di oggettivare il colore, traducendolo in numeri di validità universale. La metrica del colore o colorimetria ha avuto uno sviluppo eccezionale negli ultimi vent'anni, interessando i campi più svariati, grazie allo sviluppo di colorimetri di riflettanza, assistiti da software, in versione fissa e portatile.

Gli studiosi di colorimetria hanno individuato spazi, chiamati spazi di colore, definiti da opportune coordinate. Nella fig. 3 è rappresentato lo spazio proposto nel 1976 dalla Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), mentre la seconda parte della sigla si riferisce alle tre coordinate ortogonali che definiscono lo spazio: la coordinata L (lightness o chiarezza) che va da zero (per il nero) a 100 (per il bianco) e le coordinate cromatiche a (positiva per il grado di rosso, negativa per quello di verde) e b (positiva per il grado di giallo e negativa per quello di blu). In pochi secondi lo spettrofotometro di riflettanza registra la

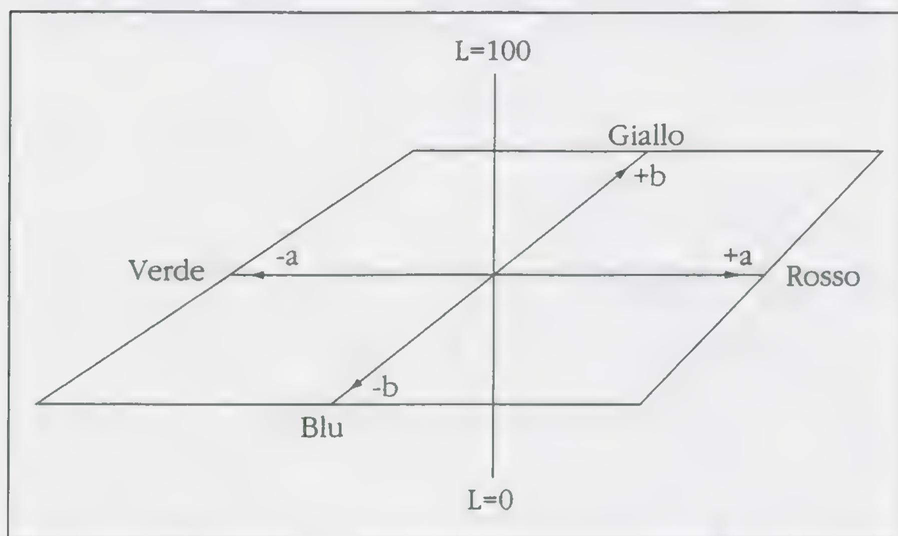


Figura 3 - Spazio di colore CIELab.

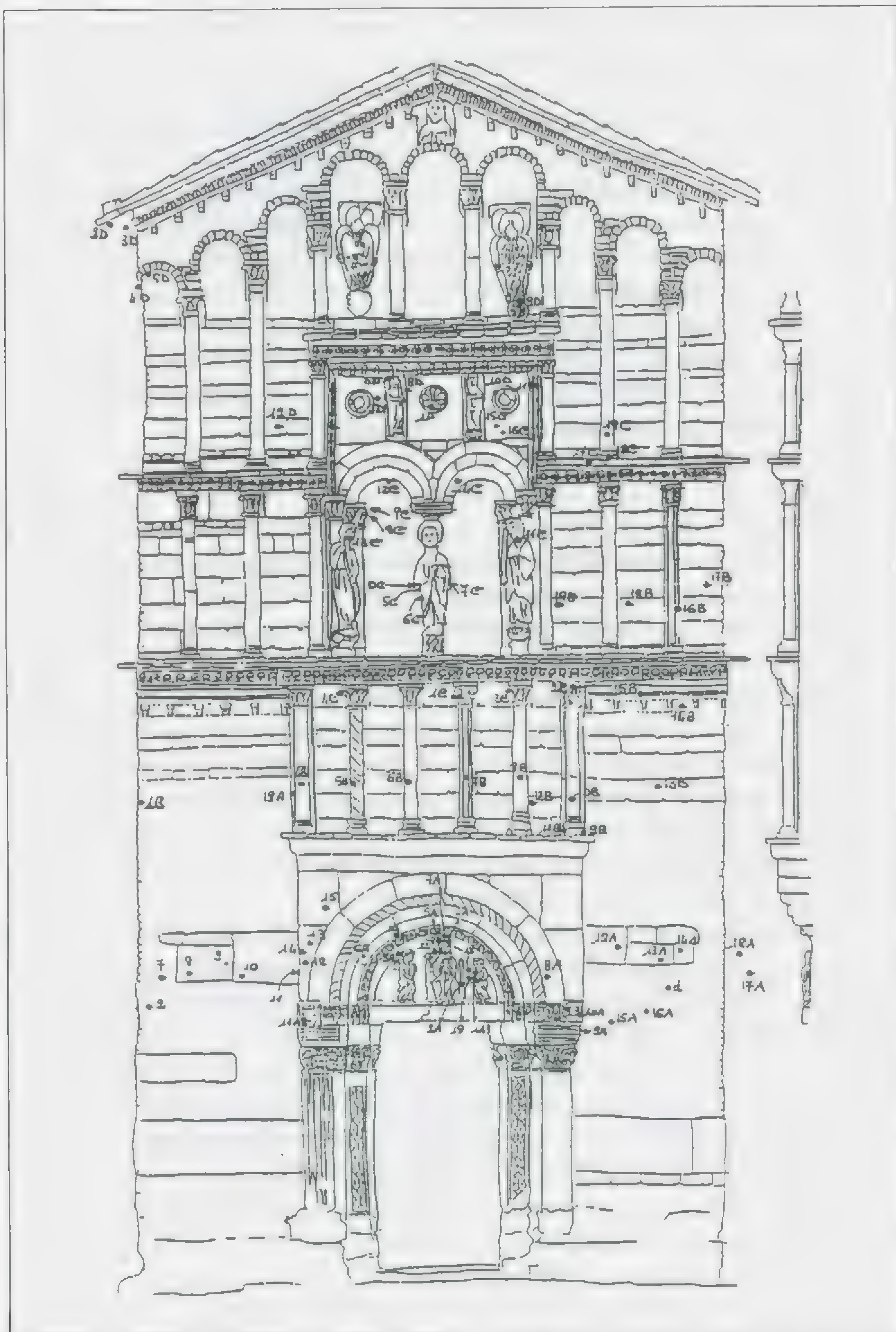


Figura 4 - Mappa delle misure di colore sulla facciata dell'Abbazia di Vezzolano.

curva di riflettanza del campione ed il software, in tempo ancora più breve, la traduce in valori numerici di L, a, b. Gli strumenti prevedono un sistema di taratura con campioni standard, per cui le misure assumono valore oggettivo ed universale. Se due campioni, uno misurato a Parigi e l'altro a Tokio, forniscono la stessa terna di valori L, a, b, il che è dire che i due punti nello spazio CIELab sono perfettamente coincidenti, si può affermare che i due campioni hanno lo stesso colore (match). Basta una piccola variazione di anche uno solo dei valori numerici, tenuto ovviamente conto dell'errore sperimentale, per dire che i due campioni hanno colore diverso. L'eventuale diatriba, prima accennata, fra il tintore ed il suo cliente, si risolve così per fax o per posta elettronica: se le terne di valori campione-imitazione sono identiche, ha vinto il tintore, in caso contrario egli paga la penale.

Si sono scelti due esempi di colorimetria vissuta, che escono dall'arido mondo del contenzioso. Nel 1990, stava per concludersi il restauro della facciata dell'Abbazia di Vezzolano, ed essendo ancora montati i ponteggi, si era ottenuta l'autorizzazione ad eseguire misure di colore con il colorimetro portatile. In questo modo si è mappato il colore della facciata secondo lo schema presentato in fig. 4. I parametri di colore ottenuti, sono serviti allora per scoprire, ad esempio, che su un certo mattone era stata stesa una pittura di tono verde in epoche passate (anche l'occhio vede quel verde, ma in modo soggettivo e lo può solo esprimere con un linguaggio aleatorio, a differenza dallo strumento che lo esprime in termini numerici oggettivi) e questi numeri serviranno in futuro, quando si vorrà mettere mano ad un ulteriore restauro, ovvero ad arricchire una banca dati sui beni culturali che consenta lavori di catalogazione, di correlazione, di diagnostica.

Il secondo esempio proviene dal mondo, non meno attraente di quello artistico, dell'enologia. Nel 1993, è stata fatta una tesi di laurea in collaborazione con la Scuola Enologica di Alba. Potendo così disporre di un parco di vini diversi per tipologia, annata e provenienza, si è costruita una mappa cromatica, valida anche dal punto di vista statistico, stante l'elevato numero di campioni esaminati (280). Nello spazio CIELab (fig. 5) si nota che, mentre il roero non mantiene una configurazione precisa, il campo di giacitura nello spazio di colore degli altri due derivati dal vitigno nebbiolo (barolo e barbaresco) si distingue da quello dei derivati dal vitigno barbera (barbera d'Alba e barbera d'Asti). La tipografia non lo evidenzia bene, tuttavia ci sono due campioni di barolo (in corrispondenza della freccia) che invadono il campo delle barbere e lasciano il chiaro sospetto di uno scambio di campioni o, ancor peggio, di una frode (confermati da altri parametri presi in esame nel lavoro di tesi).

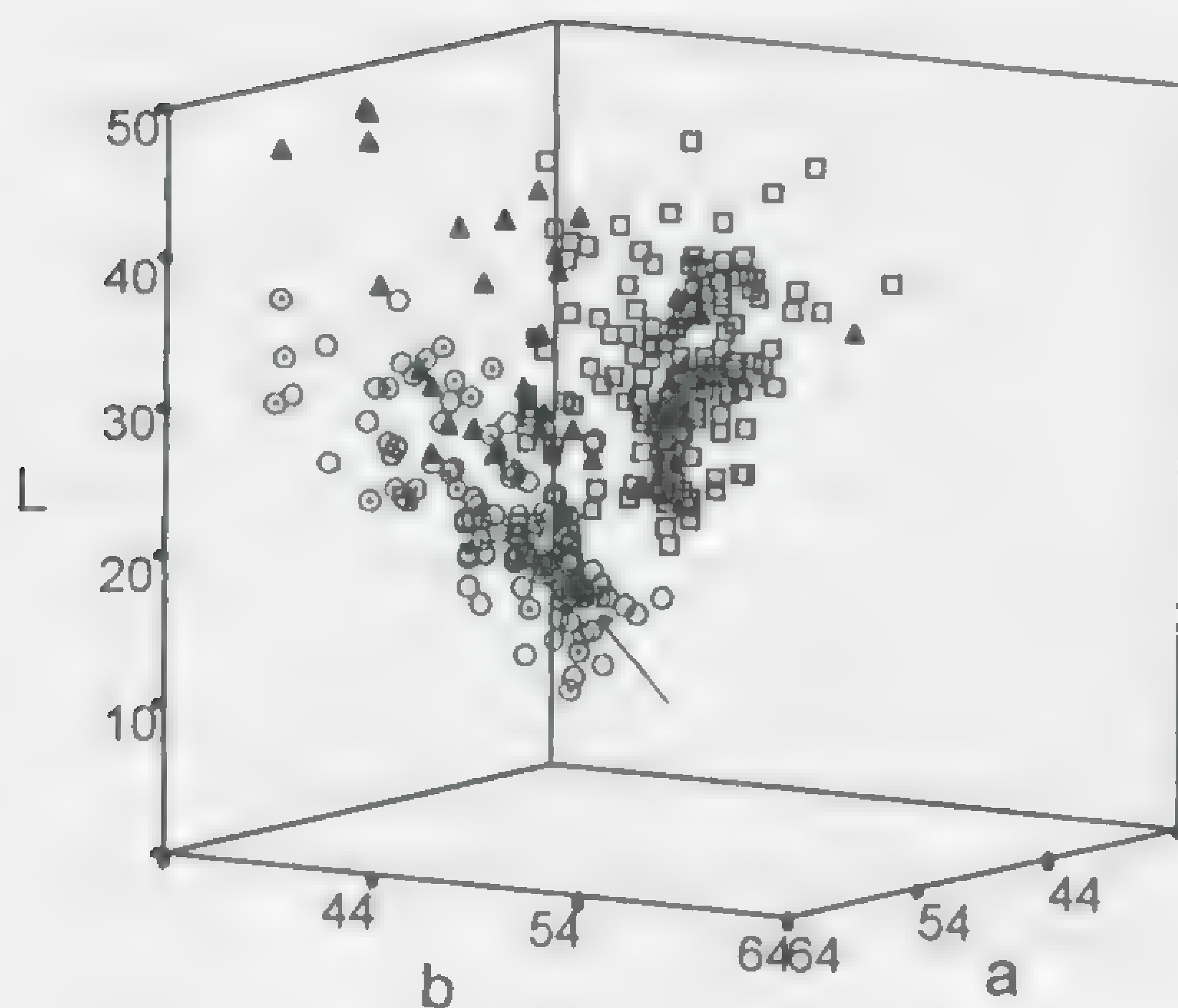


Figura 5 - Giacitura di colore dei vini nello spazio CIELab.

VINO
▲ Roero
⊙ Barbera d'Asti
□ Barolo
⌑ Barbaresco
○ Barbera d'Alba

Ancora qualche formula chimica per scagionare i coloranti, ove ce ne sia bisogno, da accuse indiscriminate.

H_3COOC, HO, NH_2 — **11**

H_3COOC, HO, $\overset{+}{N}_2\ Cl^-$ — **12**

OH, $COOCH_3$ — **13**

H_3COOC, HO, N=N, OH, $COOCH_3$ — **14**

HOOC, HO, N=N, OH, COOH — **15**

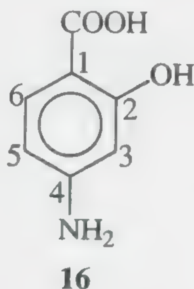
HOOC, HO, N=N, SO_2NH, N — **8**

HOOC, HO, NH_2 — **9**

H_2N, SO_2NH, N — **10**

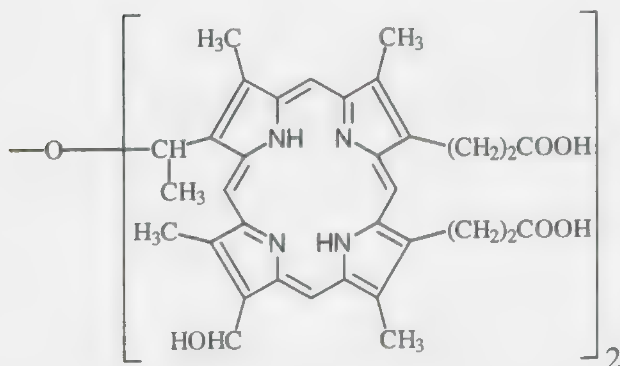
Schema 2

Il composto **8** è la SULFASALAZINA (schema 2), contiene il gruppo SO_2NH (sulfonammidico) d'onde la classe dei «sulfammidici» e viene impiegata nella cura delle coliti ulcerose, in quanto si scinde a livello intestinale liberando il vero farmaco che è **9**, acido 5-amminosalicilico (si noti che **8** è un azocolorante e **9** una ammina aromatica). L'evoluzione della sulfasalazina è rappresentata dalla OLSALAZINA, di cui viene tracciata la via di sintesi (ammina **11**, sale di diazonio **12**, copulante **13**, azocolorante **14**, idrolisi a **15**). Anche la olsalazina è un profarmaco dell'acido 5-amminosalicilico, a doppia efficacia perché ne libera due molecole. Merita raffrontare l'acido 5-amminosalicilico **9** con il suo isomero di posizione acido 4-amminosalicilico **16**, siglato con PAS, una ammina aromatica che è stata impiegata come tubercolostatico negli anni difficili della storia della malattia.

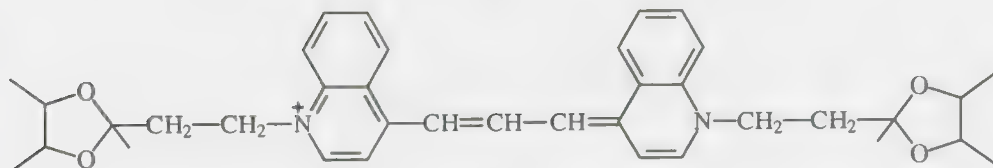


16

Sia per i suoi impieghi in terapia, sia per le immagini cinematografiche di fantascienza e non, tutti conoscono il termine laser. Il laser convenzionale produce una radiazione monocromatica, cioè di lunghezza d'onda e, quindi, di energia, ben precisa). Quando la radiazione di questo laser primario colpisce una cella contenente la soluzione di un colorante fluorescente, le molecole del colorante assorbono questa energia, cedendola sotto forma di fluorescenza. I fotoni della fluorescenza interagiscono con altre molecole di colorante già eccitate, provocandone una emissione stimolata di fluorescenza, donde l'acronimo di laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Il risultato finale è che si è trasformato un raggio laser monocromatico in un raggio policromatico (polienergetico), si possiedono cioè fotoni laser aventi energia a piacere e selezionabile con filtri. Questa è già una tra le più emblematiche applicazioni non convenzionali, sofisticate, dei coloranti. Ma è solo un'anticamera.



17



18

Tutti conoscono il termine laser e, purtroppo, conoscono anche il termine chemioterapia. Se si prendono i coloranti **17** e **18**, una porfirina ed una cianina, e li si somministra a persona affetta da carcinoma relativamente localizzato, i coloranti vanno in circolo. Se poi si dirige sulla zona o sull'organo malato un raggio laser, non monocromatico, ma di energia ben precisa quale è richiesta per eccitare i coloranti (che funzionano da fotosensibilizzatori), questi cedono l'energia assorbita all'ossigeno il quale passa, a sua volta, dallo stato fondamentale di tripletto allo stato eccitato di singoletto. E l'ossigeno singoletto è il promotore di una ampia varietà di reazioni, tra cui, nella fattispecie, l'azione killer sulle cellule tumorali, ovviamente solo là dove è stata diretta la radiazione laser. La tecnica è nota con il nome di FOTOCHEMIOTERAPIA O TERAPIA FOTODINAMICA. Quindi grazie, due volte, ai coloranti che, se in certi casi procurano il cancro, in altri, lo curano.

Si riporta infine la frase testuale che ha concluso la conferenza. «Il tempo mi impone di concludere. Quarant'anni di ricerca e didattica in questo campo mi darebbero materia per proseguire di questo passo fino a notte inoltrata. Sarei contento che usciste di qui convinti che non sono difensore d'ufficio, ma difensore appassionato».

Acc. Sc. Torino - Quaderni
7 (1998), 65-76

La poesia nel tempo

Cesare SEGRE (*)

La durata della poesia è impressionante. Entrate per esempio in una chiesa o in una sinagoga durante le funzioni. Sentirete risonare più volte i salmi di Davide. Essi sono stati scritti più di 3.000 anni fa, e continuano di generazione in generazione a esercitare il loro influsso e a suscitare emozioni in tutto il mondo monoteista. Prendiamo il salmo 42 (41 nei Settanta e nella Vulgata):

Come il cervo agogna i rivi dell'acque,
così l'anima mia agogna te, o Dio.
L'anima mia è assetata di Dio, dell'Iddio vivente.
Quando verrò, e comparirò io nel cospetto di Dio?
Le mie lagrime sono il mio cibo giorno e notte,
Mentre mi è detto tuttodì: Dove è il tuo Dio?
Io mi verso addosso l'anima mia
Quando mi riduco in memoria queste cose;
Che io passava in ischiera,
E camminava con essa infino alla Casa di Dio,
Con voce di canto e di lode, la moltitudine facendo festa.
Anima mia, perché ti abbatti, e ti commuovi in me?
Aspetta Iddio, perciocché ancora lo celebrerò;
Il suo aspetto è compiuta salvezza.
O Dio mio, l'anima mia si abbatte in me;
Perciò mi ricordo di te dal paese del Giordano,
E da' monti di Hermon, dal monte Misar.
Un abisso chiama l'altro abisso, al suon de' tuoi canali;
Tutti i tuoi flutti e le tue onde mi son passate addosso.
Il Signore di giorno manderà la sua benignità,
E di notte io avrò appo me i suoi cantici,

(*) Accademia delle Scienze di Torino; ordinario di Filologia Romanza, Università di Pavia. Conferenza tenuta il 20 Maggio 1998.

Ed orazione all'Iddio della mia vita.
Io dirò a Dio, mia Rocca: Perché mi hai tu dimenticato?
Perché vo io attorno vestito a bruno,
Per l'oppression del nemico?
I miei nemici mi fanno onta, trafiggendomi fino all'ossa,
Mentre mi dicono tuttodì: Dove è il tuo Dio?
Anima mia, perché ti abbatti, e perché ti commuovi in me?
Aspetta Iddio; perciocché ancora lo celebrerò;
Egli è la compiuta salvezza della mia faccia, e il mio Dio.

Già colpisce l'immagine del bisogno di religione come sete (sete di Dio), cui poi si collegano, con metafore acquee, le lacrime versate, le cataratte e i flutti del potere soprannaturale. Protagonista è l'anima, da cui l'autore si distacca per parlarne. Alla fine, l'anima triste anela all'aiuto di Dio; mentre all'inizio è assimilata poeticamente a un cervo desideroso di bere a una fonte. L'immagine della fonte s'irradia poi in innumerevoli simboli di ambito sacro: fonte di vita, ecc. Ma fermiamoci sul cervo. Per Davide è un animale familiare; per noi, che i cervi li abbiamo visti per lo più allo zoo, oppure in mosaici o pitture o foto o film, esso acquista un di più di esotico. Moltissimi poeti, in tutti i tempi, si rifanno a questo salmo: ricordo fra tutti il grande Camões.

Altrettanto vitale Omero, vissuto circa 2.6OO anni fa. L'*Odissea* è una forma ricorrente, un archetipo operante in infiniti testi letterari di tutti i paesi. Esempio novecentesco illustre quello dell'*Ulysses* di Joyce: un romanzo di grande modernità foggiato sulla struttura dei viaggi di Ulisse.

Si dirà che questi non sono esempi di poesia pura, ma religiosa ed epica. Dovremo allora ricordare che il concetto di poesia pura è relativamente moderno. La poesia nasce in genere legata a un'ispirazione religiosa, anzi spesso magica; o ad altri tipi d'ispirazione: didattica; celebrativa d'imprese guerriere o magari pure sportive (Pindaro). Anche se non mancano esempi di poesia fine a se stessa, a partire dagli splendidi «lirici greci».

È difficile risalire alle origini. Ma già osservando i bambini, che riassumono nel loro sviluppo la storia dell'umanità, si nota sin dall'inizio il fenomeno della glossolalia: uso ritmico e ludico di parole prive di senso, specie appunto quando i bambini non sanno ancora parlare. Questa glossolalia è stata talora imitata da poeti colti, come nel secolo scorso il tedesco Pastor Paul:

Schua ea, schua ea
o tschi biro tira pea
akki lungo ta ri fungo
u li bara ti ra tungo
latschi bungo ti tu ta.

Dove la mancanza di significato è compensata dagli accostamenti rari, in tedesco, di vocali (*ua, ea*), dalle rime interne (*lungo, bungo*, in riferimento a *fungo* e *tungo*), dai parallelismi interni (*biro - bara; tira, ta ri, ti ra*).

Anche Vico (*Scienza nuova* I, 2) lega la poesia ai primordi dell'umanità:

> La fantasia tanto è più robusta quanto è più debole il raziocinio (XXXVI);
> Il più sublime lavoro della poesia è alle cose insensate dare senso e passione, ed è proprietà de' fanciulli di prender cose inanimate tra le mani e, trastullandosi, favellarvi come se fussero, quelle, persone vive.
> Questa degnità filologico-filosofica ne appruova che gli uomini del mondo fanciullo, per natura, furono sublimi poeti (XXXVII).

Mancando naturalmente documenti scomparsi nella notte dei tempi, i testi più venerabili e antichi conservati ci dànno un'idea di quello che potesse essere tale poesia ispirata dalle impressioni vive dell'uomo primitivo di fronte alla natura formidabile e misteriosa. Ora, inutile dirlo, dobbiamo soffermarci su elementi di contenuto più che di forma. E del resto la trafila linguistica attraversata da molta poesia ne dimostra l'estrema vitalità. Ecco per esempio qualche verso (che giunge al sublime) del salmo 17 (18 nei Settanta e nella Vulgata), 8-16:

Ed egli abbassò i cieli, e discese;
E vi era una caligine sotto a' suoi piedi.
E cavalcava sopra Cherubini, e volava;
Ed era portato a volo sopra l'ale del vento.
Egli aveva poste delle tenebre per suo nascondimento;
Egli avea d'intorno a sé il suo padiglione,
Oscurità d'acque, nubi dell'aria.
Le sue nubi si dileguarono per lo splendore che scoppiava davanti a lui,
Con gragnuola e brace accese.
E il Signore tuonò nel cielo,
E l'Altissimo diede fuori la sua voce
Con gragnuola e brace accese.
Ed avventò le sue saette, e disperse coloro;
Egli lanciò folgori, e li mise in rotta.
E per lo tuo sgridare, o Signore,
E per lo soffiar del vento delle tue nari,
I canali delle acque apparvero,
E i fondamenti del mondo furono scoperti.
Egli da alto distese la mano e mi prese,
E mi trasse fuori di grandi acque.

Dunque possiamo intravvedere l'origine della poesia tanto nell'infanzia dell'umanità, quanto nell'infanzia di ogni essere umano. Va poi aggiunto che parlando di poesia non dobbiamo pensare, con preconcetto moderno, a una produzione puramente letteraria, creata a tavolino e utilizzata in una lettura silenziosa. Dobbiamo tener conto: 1) delle connessioni con la musica, dalla quale la poesia ha divorziato solo in fasi più riflesse e letterarie: poesia latina rispetto a quella greca; poesia italiana rispetto a quella provenzale; 2) degli elementi fisiologici della poesia: legami tra la metrica e il respiro o i battiti cardiaci; legami con gli organi articolatori e soprattutto con la voce, dato che la poesia non può prescindere dall'esecuzione orale; 3) soprattutto delle risonanze nella dinamica corporea, essendo noto che la poesia in origine era per lo più legata al movimento, in particolare alla danza, tanto profana quanto sacra (ancora nel secolo XI la vita poetica di *Sancta Fides* veniva danzata in chiesa). Permane in varie religioni e sette l'uso di cantare e spesso ballare, o accompagnare con movimenti ritmici, la poesia sacra. Insomma, la poesia, a differenza dalla prosa, c'investe completamente, corpo e anima, come hanno capito bene molti cantanti moderni.

La nascita della poesia nell'individuo, la cosiddetta ispirazione, è cosa che ci sfugge. Si è sempre pensato a qualcosa di soprannaturale, divino. Platone, nel suo dialogo *Ione*, immagina che il poeta voli nell'oltremondo divino, essendo i poeti, dice, «qualcosa di leggero e di alato e sacro». Alla base di tutto il contesto culturale che Socrate sta delineando, scrive Marcello Massenzio, c'è un nucleo comune: l'esperienza della rottura del limite che comprende sia l'intrusione del divino nell'umano, che diventa tramite, mediatore, portavoce del divino stesso, sia l'inverso, vale a dire l'evasione estatica dell'umano nella sfera divina. Sempre nello *Ione*, Platone nota la possibilità per il poeta di annullare i limiti di spazio e di tempo: egli può per esempio, secondo Massenzio, rendere presenti spazi e tempi mitici entro il proprio spazio-tempo, con tanta forza da rinnovare i sentimenti legati a quegli spazi lontani commovendosi o emozionandosi come se vi partecipasse. Platone nota infine un altro elemento fondamentale: la compartecipazione. Il poeta trasmette degli stati emotivi, e può verificare l'efficacia dei suoi versi quando questi stati emotivi vengono condivisi dagli ascoltatori. Perciò il poeta dipende dal pubblico e al tempo stesso il pubblico dipende da lui: la poesia si rivela un evento comunitario o, in termini più filosofici, intersoggettivo.

Nessuno può descrivere il modo in cui il poeta, prendendo lo slancio da impressioni, sentimenti e riflessioni, compie il balzo della creazione. Tuttavia abbiamo spesso documenti che ci permettono di risalire

dalle prime intuizioni all'opera definitiva, o da una serie di riflessioni alla poesia. Ecco un brano dello *Zibaldone* di Leopardi (172):

alle volte l'anima desidererà ed effettivamente desidera una veduta ristretta e confinata in certi modi, come nelle situazioni romantiche. La cagione è la stessa, cioè il desiderio dell'infinito, perché allora in luogo della vista, lavora l'immaginaz. e il fantastico sottentra al reale. L'anima s'immagina quello che non vede, che quell'albero, quella siepe, quella torre gli nasconde, e va errando in uno spazio immaginario, e si figura cose che non potrebbe se la sua vista si estendesse da per tutto, perché il reale escluderebbe l'immaginario.

Anche negli *Appunti e ricordi* per un romanzo che Leopardi non scrisse mai, si trovano altre riflessioni vicine a queste:

mie considerazioni sulla pluralità dei mondi e il niente di noi e di questa terra e sulla grandezza e la forza della natura [...] che sono un nulla in questo globo ch'è un nulla nel mondo.

Ognuno riconosce i materiali principali dell'*Infinito*, eppure nell'*Infinito* c'è un livello di poesia altissimo, supremo. Ottenuto come?

Per ora prendiamo in esame altri tipi di materiali costruttivi di canti del Leopardi. Ecco qualche riga degli *Argomenti di idilli*:

Passero solitario. Campagna in gran declivio veduta alquanti passi in lontano, e villani che scendendo per essa si perdono tosto di vista, altra immagine dell'infinito.

Abbiamo evidentemente i materiali dei vv. 2 («passero solitario alla campagna») e 33-34 («La gioventù del loco Lascia le case, e per le vie si spande») del *Passero solitario*. Che tuttavia accenna appena vagamente il tema dell'infinito, mentre sviluppa suggestioni di altri poeti, come il Petrarca («Passer mai solitario in alcun tetto Non fu quant'io», *RVF* CCXXVI, 1-2), da cui anche l'inizio del v. 3 («cantando vai», e Petrarca: «Vago augelletto, che cantando vai» *RVF* CCCLIII, 1) e la «dolce famiglia» del v. 19 (CCCX, 2), mentre da Dante viene l'«intenerisce il core» del v. 7 (*Purg*. VIII, 2). E si potrebbe andare avanti senza fine. Quello che voglio sottolineare è come nell'invenzione della poesia si possano combinare esperienze personalissime, sensazioni di un momento, ed elementi della memoria letteraria. Dal massimo dell'individualità al supermarket dei materiali culturali.

E una poesia così fondamentalmente leopardiana come il *Canto notturno di un pastore errante* non prende lo spunto dalla lettura di un articolo di rivista (il «Journal des Savants» del Settembre 1826), firmato da un ora sconosciuto barone di Meyendorff? Ecco una frase che Leopardi riporta nel suo *Zibaldone* 4399-4400:

«Plusieurs d'entre eux (d'entre les Kirkis) passent la nuit assis sur une pierre à regarder la lune, et à improviser des paroles assez tristes sur des airs qui ne le sont pas moins».

Sulla natura e la genesi interiore della poesia si sono scritti milioni di pagine. Qui, per una veloce campionatura, esaminerò qualche affermazione d'un poeta, d'un filosofo e d'un linguista. Premetto che le osservazioni e i riferimenti sono spesso simili: segno che sono abbastanza evidenti i dati fondamentali del problema, anche se poi le deduzioni che se ne traggono possono essere divergenti e spesso contrastanti.

Il poeta è ancora Leopardi, che nello *Zibaldone* ha lasciato naturalmente molte riflessioni sulla poesia. A 4235 afferma che ci sono solo tre modi di poesia: il lirico, l'epico e il drammatico. Il lirico sarebbe il più antico, «proprio di una nazione anche selvaggia; più nobile e più *poetico* d'ogni altro; vera e pura poesia in tutta la sua estensione; proprio d'ogni uomo anche incolto, che cerca di ricrearsi o di consolarsi col canto, e colle parole misurate in qualunque modo, e coll'armonia; espressione libera e schietta di qualunque affetto vivo e ben sentito dell'uomo». Collegandosi con le teorie romantiche, Leopardi vede nella poesia qualcosa di primigenio, in collegamento diretto con gli affetti, di cui è espressione, e col bisogno di confortarsi e ricrearsi.

Più ampia la riflessione di 1856:

> Queste grandi illusioni concepite in un momento o di entusiasmo, o di disperazione o insomma di esaltamento, sono in effetto le più reali e sublimi verità, o precursore di queste, e rivelano all'uomo come per un lampo improvviso, i misteri più nascosti, gli abissi più cupi della natura, i rapporti più lontani e segreti, le cagioni più inaspettate e remote, le astrazioni le più sublimi; dietro alle quali cose il filosofo esatto, paziente, geometrico, si affatica indarno tutta la vita a forza di analisi e di sintesi. Chi non sa quali altissime verità sia capace di scoprire e manifestare il vero poeta lirico, vale a dire l'uomo infiammato del più pazzo fuoco, l'uomo la cui anima è in totale disordine, l'uomo posto in uno stato di vigor febbrile, e straordinario (principalmente, anzi quasi indispensabilm. corporale), e quasi di ubbriachezza?

Qui Leopardi sviluppa l'immagine del poeta come invasato, ma invasato da una verità che il filosofo non potrà forse mai raggiungere; ubriaco e febbrile nel prendere contatto con intuizioni che in uno stato di normalità sperimenterebbe difficilmente. Insomma, il poeta è come un veggente o una sibilla attraverso la cui voce parla qualcosa di divino, come è la conoscenza del mondo e dell'uomo. Una conoscenza che ha un valore generale, diversamente dalla conoscenza storica, sempre connessa a luoghi e tempi precisi, e da quella psico-sociologica, che de-

scrive i comportamenti e le convinzioni prevalenti, ma strappandoli dal vissuto. Interessante al proposito la sottolineatura della partecipazione del corpo all'esperienza poetica.

Notevole anche l'affermata osmosi tra poesia e filosofia, che i filosofi, tra cui Benedetto Croce, non possono accettare, ma che i poeti continuano a ribadire, e probabilmente a ragione. Posso citare tra i molti uno dei maggiori, Antonio Machado, quando nel suo magnifico *Juan de Mairena* scrive:

Los grandes poetas son metafísicos fracasados.

Los grandes filósofos son poetas que creen en la realidad de sus poemas.

El escepticismo de los poetas puede servir de estímulo a los filósofos. Los poetas, en cambio, pueden aprender de los filósofos el arte de las grandes metáforas, de esas imágenes útiles por su valor didáctico o inmortales por su valor poético. Ejemplos: El río de Heráclito, la esfera de Parménides, la lira de Pitágoras, la caverna de Platón, la paloma de Kant, etc., etc.

También de los filósofos pueden aprender los poetas a conocer los callejones sin salida del pensamiento, para salir – por los tejados – de esos mismos callejones; a ver, con relativa claridad, la natural «aporética» de nuestra razón, su profunda irracionalidad, y a ser tolerantes y respetuosos con quienes la usan del revés, como don Julián Sanz del Río usaba su gabán, en los días más crudos del invierno, con los forros hacia fuera, convencido de que así abrigaba más.

Come filosofo ho scelto, forse con vostro stupore, proprio Benedetto Croce. Si sa che, dopo aver dominato per decenni il pensiero, e specialmente la critica italiani, è stato, più che avversato, rinnegato e dimenticato nella seconda metà del nostro secolo. Non penso affatto che le sue teorie vadano rivalutate; sono però convinto che le sue formulazioni aiutino a fare chiarezza, anche attraverso il nostro rifiuto. È stata per esempio più volte discussa, soprattutto per la sua staticità, la quadripartizione proposta tra le forme dello spirito. La prima sarebbe quella dell'arte o intuizione, nella quale si esprime il sentimento; la seconda quella della riflessione concettuale, elaboratrice del pensiero logico, che trasforma le intuizioni in giudizi conoscitivi della realtà. Trascuro qui le altre due forme di carattere pratico, e cioè quella economica e quella etica, sottolineando comunque che l'interpretazione sociologica della letteratura non può mettere fra parentesi l'economia, e che il rapporto fra letteratura e morale andrà affrontato in sede opportuna, senza timidezza.

Ciò che importa è che Croce, erede della filosofia idealistica dell'Ottocento, attribuisce alla poesia la posizione iniziale nei processi della conoscenza. Hegel aveva già situato l'Arte nella sfera dello Spirito assoluto, insieme con la Religione e la Filosofia, naturalmente in una triade nella quale la Filosofia costituirebbe la finale sintesi. Noi potremmo

però, senza impancarci a filosofi, far rilevare a Croce che la conoscenza logica, e filosofica in genere, è soggetta a continui cambiamenti, legata a epoche e motivazioni storiche. La poesia gode invece di una longevità che ho notato all'inizio; se anche è soggetta alle fluttuazioni del gusto, si può dire che sopravvive e continua a parlarci pur dopo tanti mutamenti nella vita dell'uomo. Probabilmente nulla di umano è eterno; ma si può ritenere che la poesia sia, tra le produzioni umane, quella che si avvicina di più all'eternità. Del resto, posso appellarmi all'ultimo dei pensieri di Leopardi citati, che conferisce alla poesia una sorta di priorità sulla filosofia.

Il punto giustamente più discusso dell'estetica crociana è l'identità di intuizione ed espressione. Che la poesia sia fondata su intuizioni si può anche accettare, purché s'intenda la parola *intuizione* nel senso più ampio, dato che vi si devono inserire anche pensieri filosofici elaborati fantasticamente, come in Dante, o suggestioni di poesie altrui, o qualunque oggetto della vita pratica e di quella intellettuale che possa entrare nel gioco dell'immaginazione. E in una poesia ci sarà forse un'intuizione seminale, ma poi e soprattutto c'è un sistema immenso d'intuizioni, elaborato ben al di là di appercezioni personali e immediate. Proprio inaccettabile, insomma, la tesi dell'identità d'intuizione ed espressione. Del resto, d'intuizioni ne abbiamo tutti, e in ogni momento; ma solo il poeta sa costruire su queste intuizioni in modo da renderle universali, talora sublimi, e perciò accettabili dai lettori.

Non possiamo nemmeno concordare con Croce quando si mostra restio a includere nell'espressione le tecniche poetiche, le tradizioni stilistiche, tutto ciò che permette appunto di parlare di espressione. Anche se poi, nel volume *La poesia*, fa ammissioni che lo avvicinano alle concezioni moderne, come quando afferma che «sola parola è veramente l'espressione poetica», o che, secondo un antico detto, «la poesia è la lingua materna del genere umano [...], il linguaggio nel suo essere genuino».

A questo punto possiamo tornare al volume *La poesia* per trovare una definizione empirica sostanzialmente accettabile:

> Che cosa è dunque l'espressione poetica, che placa e trasfigura il sentimento? È [...], diversamente dal sentimento, una teoresi, un conoscere, e perciò stesso, laddove il sentimento aderisce al particolare, e per alto e nobile che sia nella sua scaturigine, si muove necessariamente nella unilateralità della passione, nell'antinomia del bene e del male e nell'ansia del godere e del soffrire, la poesia riannoda il particolare all'universale, accoglie sorpassandoli del pari dolore e piacere, e di sopra il cozzare delle parti contro le parti innalza la visione delle

parti nel tutto, sul contrasto l'armonia, sull'angustia del finito la distesa dell'infinito. Questa impronta di universalità e di totalità è il suo carattere; e dove pare che vi siano bensì immagini ma questo carattere sia debole e manchevole, si dice che manca la pienezza dell'immagine, l'«immaginazione suprema», la fantasia creatrice, l'intima poesia.

Considerazioni preziose. Anzitutto sul sentimento che aderisce al particolare: il sentimento della persona X nella situazione y, di cui possiamo umanamente interessarci ma proprio al di fuori della poesia. Nel caso della vera poesia, questo qualsiasi sentimento viene sublimato così da farsi universale, e con ciò stesso le reazioni immediate, di dolore o di piacere, vengono ad essere trascese in una armonia superiore. Sigillo di questa armonia è, ripeto, l'universalità, da cui il valore conoscitivo, Croce dice nientemeno *teoretico*, del testo di poesia. Si capisce allora subito perché gran parte delle composizioni che, specie da giovani, scriviamo sotto la spinta immediata dei sentimenti (amore, dolore, malinconia, ecc.), abbiano bensì valore per noi, in quanto hanno concretizzato, e conservano per la nostra memoria, ciò che abbiamo sentito, ma restino di solito estranee alla poesia, se non siamo stati capaci di staccarci dal nostro momentaneo sentire e di portarlo su un piano universalmente umano.

Già Croce dunque è andato al di là delle concezioni simpatetiche della poesia: identificarsi col poeta, sentire con lui. E infatti, a pensarci bene, ci è difficile sentire come Omero o come Dante, inseriti in una società e fra passioni cui siamo completamente estranei. Possiamo identificarci con loro solo tramite quello che c'è di universale nelle loro composizioni; e allora riusciamo anche, intellettualmente, a condividere i pensieri di un greco che celebra l'avventura e il destino umano fra le volontà capricciose e discordi degli dèi, o di un guelfo bianco impegnatissimo in conflitti comunali che evochiamo con indifferenza, o nel sognare una monarchia che appartiene solo al passato. Altra identificazione possibile, e più perfetta, sarebbe quella filologica, evocante lo spirito di un'epoca con la massima completezza; ma è un impegno ermeneutico non concesso a tutti.

Come testimone della linguistica voglio addurre Roman Jakobson. Egli si è occupato moltissimo di poesia, perché riteneva che nel linguaggio poetico la lingua sia portata a sviluppare tutte le potenzialità che restano inutilizzate nel parlare comune. La lingua poetica eleverebbe dunque la lingua comune all'ennesima potenza. Jakobson si occupa spesso anche dei rapporti tra i contenuti e la forma poetica, specie dal punto di vista semiotico. Ma ha avuto la prudenza di non fornire gene-

ralizzazioni al riguardo. Quello che importa qui è l'inserzione della poesia tra gli elementi costitutivi della lingua. Vediamo come.

La lingua trasmette messaggi inviati da un emittente a un ricevente. Questi messaggi ricorrono nel loro realizzarsi a varie funzioni. Qui cito soltanto la funzione referenziale, quella conativa, quella emotiva e quella poetica. La funzione referenziale, che è orientata sul contesto, corrisponde all'uso più pratico della lingua: comunicare al destinatario notizie o dati ch'egli ignora. La funzione conativa, orientata sul destinatario, usa il linguaggio per ottenere appunto da lui, attraverso ordini o preghiere, esortazioni o simili, che faccia o dica qualcosa: ciò si verifica anche frequentemente nell'uso pratico. La funzione espressiva è orientata sull'emittente: mira all'espressione piena dei sentimenti che muovono colui che comunica, attraverso esclamazioni, iperboli, deformazioni ironiche, ecc. Che cos'è allora la funzione poetica? Secondo Jakobson è quella orientata sul messaggio stesso, mira cioè alla sua perfezione e alla sua massima efficacia. Quando è in opera la funzione poetica, i rapporti fonici e lessicali, di parallelismo o di richiamo o di opposizione vengono portati al massimo regime.

Quello che è geniale nella formulazione di Jakobson, è che le varie funzioni non sono ridotte a un ipotetico isolamento, al contrario. Nella lingua le funzioni sono tutte in opera; e perciò anche nella poesia si possono trovare la funzione conativa (quando il poeta intende ottenere o propugnare qualcosa con il suo componimento) e quella espressiva (quando non sa resistere all'espressione diretta del sentimento che lo agita). Fatto sta però che nella poesia la funzione poetica è dominante. E le decine e decine di analisi di testi poetici in tutte le lingue proposte nella sua lunga attività da Jakobson percorrono appunto tutta la fenomenologia di questo concentrarsi sul linguaggio da parte dei poeti.

C'è stato, anzi continua endemico, uno scontro tra i cosiddetti contenutisti e i cosiddetti formalisti. I primi baderebbero quasi esclusivamente al messaggio della poesia, in sostanza al mondo o alle emozioni che essa evoca e che la permeano; gli altri vedrebbero il testo come un prezioso manufatto, in cui ammirare tutte le componenti della perfezione. Lo scontro non ha molto senso. Prima di tutto si deve dire, e risulta anche dalle precedenti considerazioni, che i contenuti valgono esclusivamente a condizione che siano espressi in maniera formalmente perfetta e originale; perché i contenuti sono abbastanza comuni e diffusi: diventano mirabili e indimenticabili perché li rende tali, esaltandoli, la forma con cui sono espressi. Va poi aggiunto che la consistenza di questi contenuti è molte volte tenue, impalpabile, e anche nei maggiori poeti. L'amore cantato dai trovatori o da Petrarca è più l'idea dell'amore che un amore concreto, con la sua carnalità e le sue fasi anche

drammatiche. Naturalmente poi i poeti di questo genere avevano le loro esperienze sentimentali o sessuali, ma non le facevano oggetto dei loro versi. Insomma, è la perfezione della forma che rende straordinari, anche sublimi, i contenuti poetici, a prescindere dal loro peso, che può anche essere minimo.

Il discorso potrebbe valere per tutto il *Canzoniere* del Petrarca, che pure costituisce uno dei punti più alti della nostra lirica. Prendiamo per esempio il sonetto di apertura, una specie di prefazione scritta dopo la stesura di tutto il resto. Il contenuto è il rimorso per aver dedicato tante fatiche al sentimento amoroso, approfondendolo sia in vita, sia in morte dell'amata. Tutto questo in accordo con la moralità riflessiva in cui, attraverso le opere latine, Petrarca ha voluto inquadrare l'intera sua vicenda letteraria, capovolgendo un rapporto che in verità, per lui, metteva in primo piano la poesia. Il rimorso stesso è sofferto in forma più intellettuale che reale, tant'è vero che l'autore, questi sospiri poetici che condanna, ce li trasmette in bella copia e sicuro della loro eccellenza.

Pur nella sua semplicità, il sonetto è perfetto e ricco di allusioni colte che vi risparmio:

Voi ch'ascoltate in rime sparse il suono
di quei sospiri ond'io nudriva 'l core
in sul mio primo giovenile errore
quand'era in parte altr'uom da quel ch'i' sono,
del vario stile in ch'io piango e ragiono
fra le vane speranze e 'l van dolore,
ove sia chi per prova intenda amore,
spero trovar pietà, non che perdono.
Ma ben veggio or sì come al popol tutto
favola fui gran tempo, onde sovente
di me medesmo meco mi vergogno;
e del mio vaneggiar vergogna è 'l frutto,
e 'l pentersi, e 'l conoscer chiaramente
che quanto piace al mondo è breve sogno.

Noto solo alcuni fatti formali. L'importanza dell'allocuzione «Voi ch'ascoltate», che istituisce subito il circuito emittente-ricevente, senza poi continuare l'andamento allocutivo; è infatti evidente che l'allocutario è diverso dall'elargitore del perdono (Dio). Frequente la funzione rafforzativa o contrappositiva delle dittologie: «piango e ragiono» 5, «le vane speranze e 'l van dolore» 6, «pietà, non che perdono» 6, «e 'l pentersi, e 'l conoscer» 13. Facile notare che tra «piango e ragiono», «pietà, non che perdono» e «'l pentersi e 'l conoscer» c'è un sottile gioco di parallelismi e chiasmi: il pianto può produrre pietà e perdono negli in-

terlocutori, soprattutto in Dio, ed esprimere il pentimento del poeta; il ragionare, perciò l'implicito riflettere, ha come risultato la conoscenza della vanità del tutto.

Evidente l'onomatopea dei sospiri nelle *s* dei primi due versi: *ascoltate, sparse, suono, sospiri*, ed evidente la reiterazione del pronome personale di I[a] persona in «di *me me*desmo *meco mi* vergogno»: quasi per un'immersione nel profondo dell'interiorità. Vi sono poi richiami etimologici a distanza (*vane* e *van* 6, *vaneggiare* 12) e richiami anagrammatici: tra *rime* 1 e *primo* 7, tra *come* 9 e *meco* 11.

Questa denuncia della vanità di tanti pensieri d'amore («suono dei sospiri», «errore», «vane speranze e van dolore», «vaneggiar») culmina gloriosamente nel verso finale, «che quanto piace al mondo è breve sogno», dove il *mondo* è, religiosamente, il *saeculum*, la terrestrità immersa nel peccato, così vana da sembrare fatta col tessuto dei sogni, per dirla con Shakespeare. Ebbene, *sogno*, ultima parola, è in assonanza, a fine terzina, con *suono* e *sono* della prima quartina. Petrarca cioè ha preparato una rima A in *-ono* e, in corrispondenza, una rima E in *-ogno*, che assona con quella di A, così da ottenere la coppia *sono* e *suono*, rimanti differenziati dal dittongo, e la coppia *sono* e *sogno*, rimanti differenziati dalla palatizzazione della *n*.

Della morte della poesia, della morte della letteratura, della morte dell'arte si parla da molto tempo, almeno a partire da Hegel. Ora l'evento pare davvero incombente, dato che l'uomo è immerso nei rumori, nella spazzatura anche culturale, nei bisogni immediati e nella violenza, incapace di fare sogni diversi da quelli che gli propinano già confezionati la pubblicità e la televisione, impossibilitato a concepire ideali diversi da quelli ispirati dal proprio egoismo. Si sente originale quando si getta nel conformismo della sbracatezza e del turpiloquio, o magari nel teppismo di cui non avverte la sostanza autolesionista. Il bombardamento degli slogan, la sommarietà delle affermazioni apodittiche, la cancellazione accettata supinamente di elementi dimostrativi, di argomentazioni e di sani dubbi, rischiano di renderlo sordo alla poesia, alla riflessione, alla critica. Bisognerebbe fare appello, se ce ne restano le forze, non all'amore della poesia o dell'arte, ma all'umanità nei suoi aspetti più alti, conquistata in millenni, e non certo garantita. Altrimenti rischiamo di ritrovarci in mezzo alle meraviglie della tecnologia, con il cervello e le aspirazioni dei bestioni previchiani per allontanarci dai quali abbiamo fatto tanta fatica.

INDICE